



TUGAS AKHIR - TF 141581

***OPTIMAL TRACKING CONTROL PADA KAPAL
TANKER TANGGUH TOWUTI BERBASIS
LOGIKA FUZZY DI PELABUHAN ARUN***

ADIP TRI CAHYOKO
NRP. 2412100 025

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc PhD

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TF 141581

***OPTIMAL TRACKING CONTROL ON THE
TANGGUH TOWUTI TANKER VESSEL BASED
ON FUZZY LOGIC ARUN'S HARBOR***

ADIP TRI CAHYOKO
NRP. 2412100 025

SUPERVISOR
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc PhD

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMAL TRACKING CONTROL PADA KAPAL TANKER TANGGUH TOWUTI BERBASIS LOGIKA FUZZY DI PELABUHAN ARUN

TUGAS AKHIR

Oleh:

ADIP TRI CAHYOKO

NRP: 2412 100 025

Surabaya, Juni 2016

Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing,

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

NIP. 19660116 198903 2 001

Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc PhC

NIP. 1964 0210 198903 1001

**Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIPN: 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMAL TRACKING CONTROL PADA KAPAL TANKER TANGGUH TOWUTI BERBASIS LOGIKA FUZZY DI PELABUHAN ARUN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ADIP TRI CAHYOKO

NRP. 2412 100 025

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. (Pembimbing I)
2. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc. Ph.D. (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Ali Musyafa' M.Sc. (Ketua Penguji)
4. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. (Penguji 1)

SURABAYA

Juli, 2016

OPTIMAL TRACKING CONTROL PADA KAPAL TANKER TANGGUH TOWUTI BERBASIS LOGIKA FUZZY DI PELABUHAN ARUN

Nama Mahasiswa : Adip Tri Cahyoko
NRP : 2412 100 025
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir Aulia Siti Aisjah, MT
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc PhD

Abstrak

Kapal tanker Tangguh Towuti adalah kapal tanker pengangkut LNG yang secara rutin memasuki pelabuhan Arun. Kapal tanker harus mengikuti jalur pelayaran yang telah ditetapkan oleh pelabuhan, meskipun terdapat gangguan berupa hembusan angin yang cukup kencang. Penelitian ini melakukan kajian rancangan sistem kendali terhadap trajectory kapal tanker. Sistem kendali yang digunakan adalah kendali optimal yang dibangun oleh sistem logika fuzzy dan diterapkan pada kapal tanker Tangguh Towuti untuk mendapatkan jalur optimal dengan error lintasan yang kecil serta mampu menanggulangi efek gangguan hembusan angin. Logika fuzzy yang diterapkan sebagai pengendali menggunakan error heading dan yaw rate sebagai masukan, dan sudut rudder sebagai keluaran. Serta diterapkan pula filter Kalman untuk mendapatkan error yang optimal. Hasil simulasi tanpa menggunakan filter Kalman menunjukkan nilai error lintasan yang fluktuatif dan lebih dari standard yang ditetapkan oleh IMO. Penggunaan filter Kalman memberikan hasil error maksimal sebesar 22 meter, dan nilai error yang stabil pada sekitar 1,28 meter.

Kata Kunci: *Tangguh Towuti, Logika Fuzzy, Rudder, filter Kalman, Optimal Tracking control*

OPTIMAL TRACKING CONTROL PADA KAPAL TANKER TANGGUH TOWUTI BERBASIS LOGIKA FUZZY DI PELABUHAN ARUN

Nama Mahasiswa : Adip Tri Cahyoko
NRP : 2412 100 025
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir Aulia Siti Aisjah, MT
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc PhD

Abstract

Tangguh Towuti LNG tanker is the vessel that routinely entering the port of Arun. The tanker should follow the cruise line that has been set by the port regulator, although there is a disruption in the form of fairly strong wind gusts. The objective on this research is to developing control system of the ship trajectory. The control system used in this research is optimal control that based on fuzzy logic applied to the Tangguh Towuti tanker to get optimal paths with a small trajectory error and is able to cope with the effects of wind gusts disorders. Fuzzy logic is applied as the controller using the error heading and yaw rate as inputs, and the rudder angle as output. As well as the Kalman filter was applied also to obtain the error to be optimum. The simulation results without using a Kalman filter shows fluctuating trajectory error value and more than standards set by IMO. The use of Kalman filter resulting 22 meter maximum error, and the error value steady at about 1.28 meters.

Keyword: Tangguh Towuti, Fuzzy logic, Rudder, Kalman Filter, Optimal tracking control

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul: ***“OPTIMAL TRACKING CONTROL PADA KAPAL TANKER TANGGUH TOWUTI BERBASIS LOGIKA FUZZY DI PELABUHAN ARUN”***

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Fisika ITS.
2. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT dan Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, yang selalu memberikan semangat dan ide-ide baru.
3. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di jurusan Teknik Fisika – ITS yang telah memberikan ilmunya selama 4 tahun berkuliah di kampus ITS Surabaya.
4. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan penuh terhadap penyelesaian tugas akhir ini, baik itu berupa kasih sayang, semangat, doa dan juga usaha secara finansial.
5. Rekan-rekan Timeless Fidelity dan Solitong FC, yang senantiasa memberikan motivasi dan perhatian serta persahabatan yang erat.
6. Rekan rekan asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol TF-ITS yang senantiasa menemani dalam penyelesaian tugas akhir ini di laboratorium
7. Salman, Jovi, Saptian, Dhias serta Mas Zaini dan Azhar yang telah menemani masa sulit selama mengerjakan tugas akhir ini.

8. Teman-teman serta sahabat saya di luar kampus

Kritik dan saran siap diterima oleh penulis, karena penulis sadar bahwa tulisan ini belum sepenuhnya sempurna. Semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya

Surabaya, 10 Juni 2016
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan	3

BAB II DASAR TEORI

2.1 Manuver Kapal	5
2.2 Model Dinamika Kapal.....	6
2.3 Model Gangguan Kapal.....	9
2.4 Pemodelan Dinamika <i>Rudder</i>	11
2.5 Teorema Filter Kalman Untuk Kontroller	13
2.6 Sistem Kendali <i>Fuzzy</i>	15
2.7 Standard IMO untuk Kemampuan Manuver pada Kapal	19

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Studi Literatur.....	22
--------------------------	----

3.2 Pengumpulan Data.....	22
3.3 Pemodelan Sistem Hidrodinamika Kapal.....	24
3.4 Pemodelan Gangguan Angin.....	26
3.5 Perancangan <i>Optimal Tracking Control</i>	29
3.6 Kendali Logika Fuzzy	30

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Dinamika Kapal <i>Open Loop dan Close Loop</i>	39
4.2 Pengujian Kestabilan Kapal Menggunakan <i>Root Locus</i>	40
4.3 Validasi Koefisien Hidrodinamika	41
4.4 Pengujian Performansi Sistem <i>Tracking Control</i> Kapal Tanker Tangguh Towuti Tanpa Gangguan ..	42
4.5 Pengujian Performansi Sistem <i>Optimal Tracking Control</i> Kapal Tanker Tangguh Towuti Tanpa Gangguan.....	44
4.6 Pengujian Performansi Sistem <i>Optimal Tracking Control</i> Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan Gangguan Angin.....	47

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Derajat kebebasan kapal.....	5
Gambar 2.2	Definisi kecepatan dan arah angin (Fossen, 1994)	10
Gambar 2.3	Sistem Kemudi Kapal Tipe Van Amerongen	12
Gambar 2.4	Diagram blok loop pengendalian <i>rudder</i> (Van Amerongen, 1990).....	13
Gambar 2.5	Blok Diagram <i>state estimator</i> pada pengendalian kapal (Fossen, 2011)	15
Gambar 2.6	Logika <i>fuzzy</i> (Arifin S, 2011)	16
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> penelitian.....	21
Gambar 3.2	Jalur pelayaran di pelabuhan Arun	24
Gambar 3.3	Blok masukan dan keluaran plant kapal dengan <i>disturbance</i>	28
Gambar 3.4	Diagram blok sistem pengendalian	29
Gambar 3.5	Perancangan FIS sistem pengendalian kapal.....	30
Gambar 3.6	Fungsi keanggotaan <i>error yaw</i> logika <i>fuzzy</i>	31
Gambar 3.7	Fungsi keanggotaan <i>yaw rate</i> logika <i>fuzzy</i>	32
Gambar 3.8	Fungsi keanggotaan keluaran logika <i>fuzzy</i>	32
Gambar 3.9	Tampilan <i>Rule editor</i> logika <i>fuzzy</i>	34
Gambar 3.10	Proses inferensi logika <i>fuzzy</i>	36
Gambar 3.11	<i>Surface viewer</i> logika <i>fuzzy</i>	37
Gambar 4.1	Grafik respon <i>open loop</i> dan <i>close loop</i>	

	untuk sudut <i>rudder</i> 20°	39
Gambar 4.2	Grafik respon <i>open loop</i> dan <i>close loop</i> untuk sudut <i>rudder</i> 30°	40
Gambar 4.3	Hasil uji kestabilan <i>root locus</i>	41
Gambar 4.4	Lintasan aktual dan <i>desired</i> kapal tanker Tangguh Towuti	43
Gambar 4.5	Grafik nilai error simulasi <i>tracking control</i>	44
Gambar 4.6	Lintasan aktual dan <i>desired</i> kapal dengan sistem <i>optimal tracking control</i>	45
Gambar 4.7	Grafik nilai error simulasi <i>optimal tracking</i> <i>control</i>	46
Gambar 4.8	<i>Trajectory</i> dengan gangguan angin 2 knot sudut 20°	48
Gambar 4.9	Grafik error lintasan dengan gangguan angin 2 knot sudut 20°	49
Gambar 4.10	<i>Trajectory</i> dengan gangguan angin 2 knot sudut 30°	50
Gambar 4.11	Grafik error lintasan dengan gangguan angin 2 knot sudut 30°	51
Gambar 4.12	<i>Trajectory</i> dengan gangguan angin 2 knot sudut 40°	51
Gambar 4.13	Grafik error lintasan dengan gangguan angin 2 knot sudut 40°	52
Gambar 4.14	<i>Trajectory</i> dengan gangguan angin 7 knot sudut 20°	53
Gambar 4.15	Grafik error lintasan dengan gangguan angin 7 knot sudut 20°	54
Gambar 4.16	<i>Trajectory</i> dengan gangguan angin 7 knot sudut 30°	54
Gambar 4.17	Grafik error lintasan dengan gangguan	

angin 7 knot sudut 30°	55
Gambar 4.18 <i>Trajectory</i> dengan gangguan angin	
7 knot sudut 40°	56
Gambar 4.19 Grafik error lintasan dengan gangguan	
angin 7 knot sudut 40°	56
Gambar 4.20 <i>Trajectory</i> dengan gangguan angin	
15 knot sudut 20°	57
Gambar 4.21 <i>Trajectory</i> dengan gangguan angin	
15 knot sudut 20°	58
Gambar 4.22 <i>Trajectory</i> dengan gangguan angin	
15 knot sudut 30°	59
Gambar 4.23 <i>Trajectory</i> dengan gangguan angin	
15 knot sudut 30°	59
Gambar 4.24 <i>Trajectory</i> dengan gangguan angin	
15 knot sudut 40°	60
Gambar 4.25 <i>Trajectory</i> dengan gangguan angin	
15 knot sudut 40°	61

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Derajat kebebasan kapal.....	5
Tabel 3.1	Spesifikasi kapal tanker Tangguh Towuti	23
Tabel 3.2	Koefisien gaya dan moment angin	27
Tabel 3.3	Besar gaya dan moment angin.....	27
Tabel 3.4	Nilai gaya dan moment angin dalam <i>non dimensional</i>	28
Tabel 3.5	Basis aturan logika <i>fuzzy</i>	33
Tabel 4.1	Validasi koefisien hidrodinamika.....	42

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

Notasi	Keterangan	Satuan
x	Posisi <i>surge</i>	Meter
y	Posisi <i>sway</i>	Meter
z	Posisi <i>heave</i>	Meter
ϕ	Sudut <i>roll</i>	Rad
θ	Sudut <i>pitch</i>	Rad
ψ	Sudut <i>yaw</i>	Rad
u	Kecepatan <i>surge</i>	Meter /detik
X	Gaya <i>surge</i>	Newton
Y	Gaya <i>sway</i>	Newton
	Gaya <i>heave</i>	Newton
Z		
N	Momen <i>yaw</i>	Newton meter
X'	Gaya <i>surge</i> non dimensi	
Y'	Gaya <i>sway</i> non dimen	
N'	Momen <i>yaw</i> non dimensi	
m	Massa kapal	Kg
$X_{u\dot{u}}$	Turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap u	Newton.dtk ² /m
$Y_{v\dot{v}}$	Turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $v\dot{v}$	Newton.dtk ² /m
$Y_{r\dot{r}}$	Turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $r\dot{r}$	Newton.dtk ² /rad
$N_{r\dot{r}}$	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap $r\dot{r}$	Newton.dtk ²
X_u	Turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap u	Newton.dtk/m
Y_v	Turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap v	Newton.dtk/m
Y_r	Turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap r	Newton.dtk
N_v	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap v	Newton.dtk

Nr	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap r	Newton.dtk ²
Iz	Momen inersia terhadap sumbu z	Newton.m
δ	Defleksi <i>rudder</i>	Derajat
X _G	Pusat massa	meter
ρ	Rapat massa air laut	1014 kg/m ³
g	Percepatan gravitasi bumi	9,8 m/dtk ²
L	Panjang kapal	Meter
U	Kecepatan servis kapal	Meter/detik
B	Lebar kapal	Meter
T	Kedalaman kapal	Meter
CB	Koefisien blok kapal	
A δ	Perbandingan luasan rudder	
m	massa	
Ψ_d	Heading yang diharapkan	Derajat
δ_d	Demand rudder yang diharapkan	Derajat
KLF	Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	
e	error	
r	Yaw rate	
NB	Negative Big	
NM	Negative Medium	
NS	Negative Small	
ZE	Zero	
PS	Positive Small	
PM	Positive Medium	
PB	Positive Big	
S	Small	
M	Medium	
B	Big	
NE	Near	
M	Medium	
F	Far	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pelabuhan Arun adalah salah satu pelabuhan penting yang berlokasi di provinsi Nanggroe Aceh Darussalam. Pelabuhan Arun merupakan pelabuhan milik PT Perta Arun Gas yang berfungsi sebagai terminal penerimaan dan regasifikasi gas LNG (*liquefied natural gas*) dari lapangan Tangguh di Kabupaten Teluk Bintuni Papua. Pengangkutan gas LNG menuju ke pelabuhan Arun menggunakan kapal tanker khusus untuk mengangkut gas LNG. Salah satu kapal yang rutin memasuki pelabuhan Arun adalah kapal tanker Tangguh Towuti yang memuat LNG untuk diregasifikasi di terminal regasifikasi Arun.

Setiap pelabuhan memiliki jalur bagi kapal yang akan masuk atau keluar. Jalur tersebut harus dilewati oleh kapal baik untuk sandar maupun untuk menuju ke laut lepas. Adanya gangguan berupa angin, arus laut dan gelombang laut mengakibatkan kapal tidak berada tepat pada jalur yang telah ditentukan. Hal ini tentu sangat merugikan dikarenakan kapal akan mengalami penundaan kedatangan di pelabuhan, sehingga akan menambah biaya baik untuk operasional kapal maupun untuk sewa *tugboat* dan biaya kepelabuhanan yang lainnya.

Suatu sistem kendali yang dapat mengendalikan manuver kapal tanker Tangguh Towuti diterapkan untuk mengantisipasi gangguan pada kapal, sehingga kapal dapat bergerak sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan. Kendali optimal diterapkan pada kapal tanker Tangguh Towuti guna untuk meminimalisir atau menghilangkan error antara *desired track* dengan posisi kapal sebenarnya. Kendali optimal akan memberikan nilai optimal untuk sinyal kendali kepada aktuator yang akan mempengaruhi manuver gerakan kapal tanker Tangguh Towuti. Manuver gerakan kapal dihasilkan oleh kinerja dari aktuator. Beberapa diantaranya adalah *propeller*, *thruster* dan *rudder* dimana ketiganya akan dikendalikan untuk membuat kapal dapat bergerak sesuai dengan jalur yang telah ditentukan. (Gunawan, 2013).

Tugas akhir ini menggunakan logika *fuzzy* sebagai sistem kendali yang mengatur aktuator kapal tanker Tangguh Towuti. Logika *fuzzy* dipilih karena konsep logikanya mudah dipahami karena menggunakan bahasa alami. Logika *fuzzy* juga sangat fleksibel dan dapat digabungkan dengan metode pengendalian konvensional yang lainnya (Arifin S, 2011). Penelitian mengenai sistem pengendalian pada kapal semakin berkembang. Salah satu yang menjadi tujuan penting disini adalah menentukan lintasan dan kecepatan optimal pada kapal untuk menjauhkan dari hambatan diam maupun kapal yang bergerak ketika jaraknya semakin mendekati (Zhang, 2013). Pada tugas akhir ini *optimal tracking control* yang berbasis logika *fuzzy* diterapkan pada kapal tanker Tangguh Towuti untuk mengendalikan sudut *rudder* dan kecepatan di permukaan laut. Sehingga kapal dapat berjalan sesuai dengan jalur yang telah ditentukan di pelabuhan Arun.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Bagaimanakah pemodelan dinamik dari kapal tanker Tangguh Towuti?
- b. Bagaimanakah cara memvalidasi model kapal tanker Tangguh Towuti?
- c. Bagaimana cara merancang sistem kendali optimal pada kapal tanker Tangguh Towuti berbasis logika *fuzzy*?
- d. Apakah performansi sistem *optimal tracking control* mampu menghasilkan *trajectory* sesuai dengan peraturan pelabuhan?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Didapatkan pemodelan dinamik dari kapal tanker Tangguh Towuti.
- b. Didapatkan validasi model kapal tanker Tangguh Towuti.
- c. Didapatkan sistem kendali optimal pada kapal tanker Tangguh Towuti berbasis logika *fuzzy*.

- d. Didapatkan performansi sistem *optimal tracking control* mampu menghasilkan *trajectory* sesuai dengan peraturan pelabuhan

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a Kapal yang digunakan terbatas pada kapal tanker Tangguh Towuti.
- b Metode yang digunakan untuk perancangan sistem kendali adalah metode logika *fuzzy*.
- c Distribusi massa pada kapal homogen.
- d Variabel yang dikendalikan adalah 3 derajat kebebasan (*degree of freedom*) yang didekati dengan model 1 DOF untuk gerak yaw, dengan asumsi bahwa secara eksperimen gerak *surge*, *sway*, *pitch*, *roll* dan *heave* tidak berpengaruh pada gerak manuver kapal. Di samping yaw, variable lain yang dikendalikan adalah kecepatan kapal.
- e Gangguan (*disturbance*) pada dinamika kapal sepanjang jalur pelayaran adalah gaya angin.

1.5 Sistematika laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab I ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika laporan.

BAB II Teori Penunjang

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti model dinamika kapal, sistem *fuzzy*, dan sistem pengendali *tracking optimal*.

BAB III Metodologi Penelitian

Pada bab ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

BAB IV Analisis Data dan Pembahasan

Pada bab ini berisi tentang data hasil penelitian dari simulasi kendali logika *fuzzy* dan analisis dari performansi sistem kendali menggunakan logika *fuzzy*.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Pada bab ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

BAB II TEORI PENUNJANG

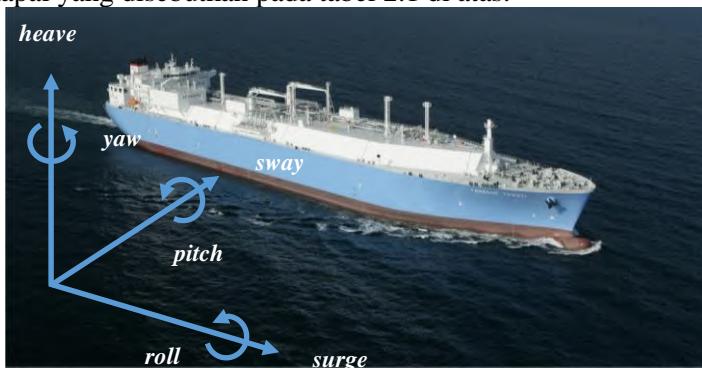
2.1 Manuver Kapal

Dinamika gerak pada sebuah kapal, ada enam gerakan yang terjadi ketika bergerak di laut. Enam arah gerakan tersebut yaitu *yaw*, *heave*, *surge*, *sway*, *roll*, dan *pitch*. Gerakan-gerakan ini disebut juga 6 *Degree of Freedom* (6 derajat kebebasan). Tabel 2.1 menjelaskan gerakan translasi dan rotasi pada kapal dalam 6 DOF.

Tabel 2.1 Derajat kebebasan kapal (Fossen, 2011)

DOF	Gerakan	Gaya dan momen	Kecepatan linear dan angular	Posisi dan sudut Euler
1	Gerak pada arah-x (surge)	X	u	x
2	Gerak pada arah-y (sway)	Y	v	y
3	Gerak pada arah-z (heave)	Z	w	Z
4	Rotasi pada sumbu x (roll)	K	p	Φ
5	Rotasi pada sumbu y (pitch)	M	q	Θ
6	Rotasi pada sumbu z (yaw)	N	r	Ψ

Gambar 2.1 di bawah ini menjelaskan ilustrasi 6 DOF pada kapal yang disebutkan pada tabel 2.1 di atas.



Gambar 2.1 Derajat kebebasan kapal (www.panoramio.com)

Berikut di bawah ini adalah persamaan bentuk umum untuk dinamika kapal di permukaan laut.

$$M\dot{v} + Dv = \tau_L \quad (2.1)$$

dengan $v = [u, v, r]^T$ merupakan vektor kecepatan dalam arah *surge*, *sway*, dan *yaw*, serta. M dan D merupakan matrik inersia dan redaman yang diperoleh dari linierisasi persamaan gaya dan momen pada arah *surge*, *sway* dan *yaw* (Fossen, 2011).

2.2 Model Dinamika Kapal

Pemodelan dinamika kapal didapatkan dari turunan hukum II Newton. Pendekatan dilakukan oleh Nomoto (1957) dan didapatkan model dinamik kapal sebagai persamaan matematis orde 2. Orde pada model Nomoto ditentukan berdasarkan fungsi transfer antara $\tau(s)$ *yaw rate* dan $\delta(s)$ sinyal *rudder* (Fossen, 2011). Berikut ini adalah fungsi transfer model dinamika kapal.

$$\frac{\tau}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2.2)$$

Model matematis *heading* kapal ditentukan pada persamaan berikut. Fungsi transfer model matematis sudut *heading* kapal dituliskan pada persamaan (2.3).

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2.3)$$

dimana ψ adalah sudut *heading* kapal dan δ_R adalah sudut *rudder* kapal. Fungsi transfer persamaan 2.3 di atas menjelaskan tentang hubungan antara sudut *rudder* kapal sebagai masukan dan sudut *heading* kapal sebagai keluaran. Parameter parameter K_R , T_1 , T_2 dan T_3 pada pemodelan Nomoto diperoleh dari persamaan 2.4 hingga 2.7.

$$T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} \quad (2.4)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \quad (2.5)$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.6)$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.7)$$

Matriks M dan D dibentuk dari koefisien hidrodinamika kapal. Besar koefisien hidrodinamika kapal tergantung pada spesifikasi kapal, yaitu: panjang (L), lebar (B), kedalaman (T), koefisien blok (C_B), kecepatan, pusat gravitasi (X_G), dan *displacement* (m).

Dimana elemen m_{ij} , n_{ij} dan b_i ($i=1,2$ dan $j=1,2$) didapatkan dari matriks persamaan 2.8.

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m x_g - Y_{\dot{r}} \\ m x_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & m u_0 - Y_r \\ N_v & m x_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Pada matriks M dan N di atas mengandung parameter hidrodinamika kapal, sebagai berikut.

- m : massa kapal
- x_g : *specific gravity*
- I_z : momen inersia di arah sumbu z (*heave*)
- u_0 : kecepatan linier di arah sumbu x (*surge*)
- $Y_{\dot{v}}$: turunan gaya arah *sway* terhadap \dot{v}
- $Y_{\dot{r}}$: turunan gaya arah *sway* terhadap \dot{r}
- Y_v : turunan gaya arah *sway* terhadap v
- Y_r : turunan gaya arah *yaw* terhadap r
- $N_{\dot{r}}$: turunan momen *yaw* terhadap \dot{r}
- N_v : turunan momen *sway* terhadap v

- $N_{\dot{v}}$: turunan momen *sway* terhadap \dot{v}
 N_r : turunan momen *yaw* terhadap r .
 Y_{δ} : Gaya *rudder* di sumbu y (*sway*)
 N_{δ} : Momen *rudder* di sekitar sumbu z (*yaw*)

Dengan:

$$\det(M) = (m - Y_{\dot{v}}) - (I_z - N_{\dot{r}}) - (mx_g - N_{\dot{v}}) - (mx_g - Y_{\dot{r}}) \quad (2.9)$$

$$\det(N) = Y_v(N_r - mx_g u) - N_v(Y_r - mu) \quad (2.10)$$

$$b_1 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_g - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.11)$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_g - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.12)$$

Teori *slender body strip* mengatakan bahwa turunan koefisien hidrodinamika dapat dinyatakan sebagai fungsi dari rasio panjang terhadap lebar dari kapal, dengan dikalikan sebuah konstanta tertentu. Koefisien hidrodinamika pada persamaan merupakan bentuk non dimensi yang diturunkan dengan sistem *Prime I* (Fossen, 2011). Untuk memperoleh besaran gaya dikalikan dengan $\frac{1}{2} \rho U^2 L^2$ dan momen dikalikan dengan $\frac{1}{2} \rho U^2 L^3$. Dimana ρ = rapat massa air laut (1014 kg/m^3), L = panjang kapal, U = kecepatan servis kapal, B = lebar kapal, T = kedalaman kapal, C_B = koefisien blok. Persamaan koefisien hidrodinamika dinyatakan pada persamaan 2.13 hingga 2.24.

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (2.14)$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.041 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.15)$$

$$\frac{-N'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.16)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.14 \frac{C_B B}{T} \quad (2.17)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.08 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.18)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L}\right) \quad (2.19)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{4} + 0.039 \left(\frac{B}{T}\right) - 0.56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.20)$$

$$Y'_\delta = \rho \frac{\pi A_\delta}{4 L T} \quad (2.21)$$

$$N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta \quad (2.22)$$

$$I'_Z = m' \cdot X'_G + I_r' \quad (2.23)$$

$$I'_r = m' \cdot r^2 \quad (2.24)$$

2.3 Model Gangguan pada Kapal

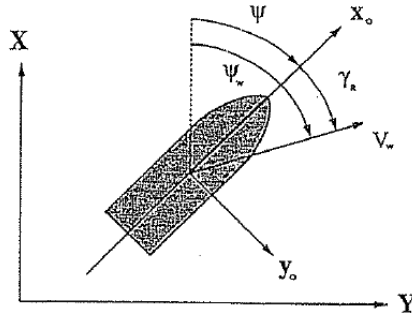
Gerakan kapal yang tidak mampu mengikuti jalur yang telah ditentukan dikarenakan oleh gangguan dari lingkungan, yakni dari gelombang laut dan hembusan angin. Gambar ilustrasi gangguan angin pada kapal dijelaskan pada gambar 2.2. Resultan gaya dan momentum dari angin yang bekerja pada permukaan kapal didefinisikan sebagai kecepatan angin relatif V_R (knot) dan sudut γ_R (derajat) sesuai dengan (Fossen, 2011) :

$$V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad \gamma_R = \tan^{-1}(v_R/u_R) \quad (2.25)$$

Dimana komponen V_R pada arah x dan y adalah:

$$u_R = V_w \cos(\gamma_R) - u + u_c \quad (2.26)$$

$$v_R = V_w \sin(\gamma_R) - v + v_c \quad (2.27)$$



Gambar 2.2 Definisi kecepatan dan arah angin (Fossen, 1994)

Hambatan angin pada kapal dijelaskan oleh Isherwood (1972) sebagai gaya dan momen angin dalam persamaan 2.28-2.30.

$$X_{wind} = \frac{1}{2} C_X(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T \quad (2.28)$$

$$Y_{wind} = \frac{1}{2} C_Y(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L \quad (2.29)$$

$$N_{wind} = \frac{1}{2} C_N(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L L \quad (2.30)$$

dimana X_{wind} adalah gaya angin arah sumbu x, Y_{wind} adalah gaya angin arah sumbu y, dan N_{wind} adalah momen gaya angin dengan pusat sumbu z.

dengan:

C_X C_Y C_N	: koefisien gaya dan momen angin
ρ_w	: densitas udara (kg/m^3)
V_R	: kecepatan angin relatif (knot)
A_T	: Luasan transversal (m^2)
A_L	: Luasan lateral (m^2)
A_{SS}	: Luasan lateral dari <i>superstructure</i> (m^2)
L	: Panjang keseluruhan kapal (m)
γ_R	: Arah angin (derajat)

Besar koefisien gaya dan momen angin dalam arah *surge*, *sway*, dan *yaw* ditentukan menggunakan persamaan 2.31-2.33.

$$C_x = A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L^2} + A_2 \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \frac{L}{B} + A_4 \frac{S}{L} + A_5 \frac{C}{L} + A_6 M \quad (2.31)$$

$$C_Y = B_0 + B_1 \frac{2A_L}{L^2} + B_2 \frac{2A_T}{B^2} + B_3 \frac{L}{B} + B_4 \frac{S}{L} + B_5 \frac{C}{L} + B_6 \frac{A_{SS}}{A_L} \quad (2.32)$$

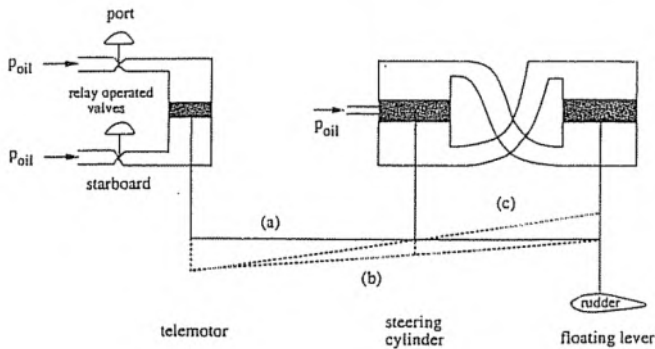
$$C_N = C_0 + C_1 \frac{2A_L}{L^2} + C_2 \frac{2A_T}{B^2} + C_3 \frac{L}{B} + C_4 \frac{S}{L} + C_5 \frac{C}{L} \quad (2.33)$$

Dimana nilai A_i dan B_i ($i=1 \dots 6$) dan C_j ($j=1 \dots 5$) ditampilkan pada tabel di Lampiran E beserta dengan perhitungan untuk menentukan besar gaya angin yang bekerja pada kapal.

2.4 Pemodelan Dinamika *Rudder*

Setiap sistem pengendalian memerlukan sebuah aktuatur yang berfungsi untuk memberikan aksi langsung kepada *plant* sesuai dengan sinyal kendali yang diberikan kepada aktuatur tersebut. Sistem pengendalian pergerakan kapal, yang menjadi aktuatur adalah *rudder*. *Rudder* pada kapal berfungsi untuk menjaga arah pergerakan kapal sesuai dengan posisi yang diinginkan. *Rudder* juga disebut sebagai *steering machine* dari kapal akan fungsinya tersebut.

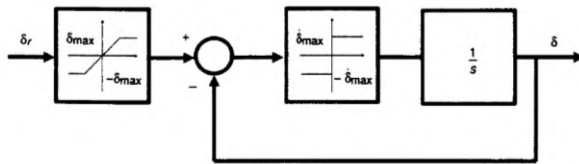
Model matematis dari *rudder* pada tugas akhir ini didasarkan pada tipe *rudder* Van Amerongen (1982). Aktuatur kapal dikendalikan dengan menggunakan sistem kendalli on-off. Sinyal on-off dari *rudder controller* digunakan untuk membuka atau menutup katup dari sistem telemotor yang berada pada *port* dan *starboard* kapal (Fossen, 1994).



Gambar 2.3 Sistem Kemudi Kapal Tipe Van Amerongen

Sistem kerja *rudder* tipe Van Amerongen ditampilkan pada gambar 2.3 di atas. Spesifikasi kemampuan kerja antara -35° sampai dengan 35° dan laju kerja *rudder* $2,3^\circ - 7^\circ/\text{s}$. Sebelum *rudder* bekerja pada posisi (a), adanya perubahan tekanan pada *port* yang lebih tinggi akan menyebabkan bukaan *valve* di *port* (b), sehingga menyebabkan *valve* silinder *steering* terbuka, konsekuensinya posisi menjadi (c) dan ini menyebabkan terjadi bukaan *valve* pada *starboard*, demikian juga sebaliknya apabila tekanan pada *starboard* lebih tinggi.

Masukan pada sistem servo berasal dari keluaran *autopilot* kendali logika *fuzzy* yang dikatakan sebagai sinyal *command rudder* (δ_c) sedangkan keluaran dari sistem *rudder* adalah defleksi *rudder* aktual (δ). Spesifikasi parameter untuk sistem *rudder* ini sesuai dengan sistem kemudi dengan laju *rudder* minimum $2,3^\circ/\text{s}$ dan maksimum $PB = 7^\circ/\text{s}$, histeresis $H = 0,8^\circ$, dan gain pada telemotor $K = 4^\circ/\text{s}$. Respon dari *rudder* dengan tipe Van Amorengen pada saat sinyal menggerakkan *rudder* akan bergerak secara linier sampai mencapai heading sekitar 63,2% dari heading yang diharapkan, dan akan menurun secara linier pada nilai di sekitar 63,2% kemudian bernilai konstan sampai heading mencapai kondisi steady.



Gambar 2.4 Diagram blok loop pengendalian *rudder* (Van Amerongen, 1990)

Gambar 2.4 di atas adalah representasi dari sistem *rudder* yang disederhanakan pada simulasi kendali autopilot di komputer. Representasi ini berdasarkan telemotor yang lebih cepat daripada mesin servo utama. Selain itu juga berdasarkan *time* konstan yang tidak begitu berpengaruh dibandingkan dengan pengaruh kecepatan *rudder*. Umumnya, sudut *rudder* dan laju *limiter rudder* berada pada *range* $\delta_{\max} = 35^\circ$ dan $2,3^\circ/\text{s} \leq \dot{\delta}_{\max} < 7^\circ/\text{s}$ untuk kebanyakan kapal komersial (Fossen, 1994).

2.5 Teorema Filter Kalman untuk Pengendali

Filter Kalman digunakan untuk mengestimasi variabel yang dikendalikan dengan membandingkan antara masukan dan keluaran dari *plant*. Hal ini tentu membutuhkan model yang memiliki hubungan masukan dan keluaran untuk memberikan sinyal *feedback* tetapi dapat juga diikuti oleh perubahan *noise* nya.

Filter Kalman adalah estimator optimum yang mengestimasi *state* dari suatu sistem linear yang berkembang secara dinamis terhadap fungsi waktu. Estimator optimum dapat didefinisikan sebagai suatu algoritma yang memproses seluruh data yang tersedia untuk memberikan sebuah estimasi dari “*state*” suatu sistem, sedangkan pada waktu yang sama mengestimasi beberapa kriteria pengoptimalan yang sudah diketahui sebelumnya. (Ghanai, 2010).

Penyusunan Filter Kalman sebagai estimator optimum membutuhkan suatu model *plant* kapal dalam bentuk *state space*. Bentuk *state space* dari *plant* diturunkan dari fungsi transfer *plant* tersebut, sehingga pada tugas akhir ini bentuk *state space* yang digunakan diturunkan dari pemodelan Nomoto orde dua.

Fungsi transfer harus diubah menjadi bentuk *state space* agar dapat dilakukan estimasi *state* oleh Filter Kalman. Berikut ini akan dijabarkan penurunan persamaan mengubah fungsi transfer menjadi bentuk *state space* dengan *numerator* dan *denominator* yang berbeda.

Persamaan fungsi transfer:

$$\frac{y}{u} = G(s) = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.34)$$

Dimisalkan menjadi:

$$\frac{y}{u} = \frac{y}{v} \cdot \frac{v}{u} \quad (2.35)$$

$$y/v = N(s) \quad v/u = 1/D(s) \quad (2.36)$$

Untuk $v/u = 1/D(s)$, maka:

$$\ddot{v} + a_1 \dot{v} + a_2 v + a_3 v = u \quad (2.37)$$

Gunakan vektor

$$x = \begin{bmatrix} \ddot{v} \\ \dot{v} \\ v \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Sehingga untuk mendapatkan \dot{x} :

$$\dot{x} = A_2 x + B_2 u \quad (2.39)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ dan } B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Untuk menentukan $\frac{y}{v} = N(s)$

$$y = b_1 \ddot{v} + b_2 \dot{v} + b_3 v \quad (2.41)$$

$$y = [b_1 \quad b_2 \quad b_3] \begin{bmatrix} \ddot{v} \\ \dot{v} \\ v \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$y = C_2 x + [0]u \quad (2.43)$$

Filter Kalman untuk sistem waktu kontinyu *steady state* dijabarkan melalui persamaan sebagai berikut.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew \quad (2.44)$$

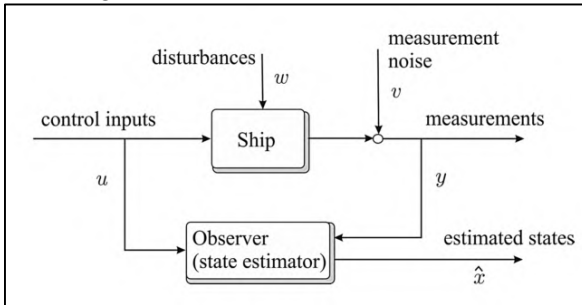
$$y = Hx + v \quad (2.45)$$

Dengan w dan v adalah *zero-mean Gaussian white noise*, serta \dot{x} dan y adalah model *state space* dari *plant*. Filter kalman *steady state* diberikan sebagai berikut.

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + K_{\infty}(y - H\hat{x}) \quad (2.46)$$

$$K_{\infty} = P_{\infty}H^TR^{-1} \quad (2.47)$$

K_{∞} adalah gain Kalman.



Gambar 2.5 Blok diagram *state estimator* pada pengendalian kapal (Fossen, 2011)

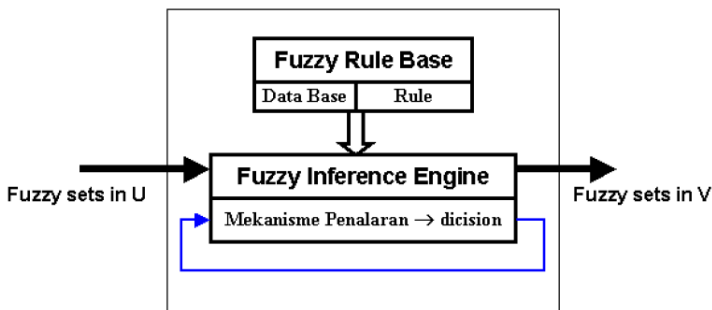
Gambar 2.5 di atas menunjukkan blok diagram penggunaan *state estimator* pada sistem pengendalian manuver kapal. Dimana *observer* memiliki dua masukan, yakni sinyal kendali dan dari pengukuran.

2.6 Sistem Kendali Fuzzy

Logika *fuzzy* adalah suatu logika yang memungkinkan nilai keanggotaannya diantara 0 dan 1. Logika *fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh, profesor ilmu komputer Universitas California Berkeley pada tahun 1965 (Arifin, n.d).

Logika Fuzzy adalah peningkatan dari logika Boolean yang berhadapan dengan konsep kebenaran sebagian. Saat logika klasik menyatakan bahwa segala hal dapat diekspresikan dalam istilah biner (0 atau 1, hitam atau putih, ya atau tidak), logika fuzzy menggantikan kebenaran boolean dengan tingkat kebenaran. Logika *fuzzy* banyak diterapkan pada sistem pengendalian maupun sistem pengambilan keputusan. Berikut ini adalah keunggulan penggunaan logika *fuzzy*. Berikut ini adalah keunggulan logika *fuzzy* dibandingkan dengan logika lainnya.

- a Konsep logika *fuzzy* mudah untuk dipahami
- b Logika *fuzzy* sangat fleksibel dalam penggunaannya
- c Logika *fuzzy* dapat mentoleransi data data yang tidak tepat atau tidak akurat
- d Logika *fuzzy* dapat memodelkan fungsi nonlinear dengan kompleksitas yang berubah ubah
- e Logika *fuzzy* dapat digabungkan dengan teknik pengendalian konvensional lainnya
- f Logika *fuzzy* berdasarkan pada bahasa natural, sehingga mudah dipahami



Gambar 2.6 Logika *fuzzy* (Arifin S, 2011)

Fungsi bagian pada gambar 2.7 di atas adalah sebagai berikut:

- a *Fuzzifier* berfungsi untuk mentransformasikan sinyal masukan yang bersifat *crisp* (bukan *fuzzy*) ke dalam himpunan *fuzzy* dengan menggunakan operator fuzzifikasi. variabel masukan

(*crisp*) dipetakan ke bentuk himpunan *fuzzy* sesuai dengan variasi semesta pembicaraan masukan. Pemetaan titik-titik numerik (*crisp points*) $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)^T \in U$ ke himpunan *fuzzy* A pada semesta pembicaraan U . Data yang telah dipetakan selanjutnya dikonversikan ke dalam bentuk *linguistik* yang sesuai dengan label dari himpunan *fuzzy* yang telah terdefinisi untuk variabel masukan sistem.

- b *Fuzzy rule base* berisi pernyataan-pernyataan logika *fuzzy* (*fuzzy statement*) yang berbentuk pernyataan *if-then*. atau dapat juga dituliskan **IF** x is A **THEN** y is B , dimana *antecedent* berisi himpunan fakta masukan (sebab) dan *consequent* berisi himpunan fakta keluaran (akibat). **IF ... THEN ...** dalam logika *fuzzy* akan melakukan pemetaan dari himpunan *fuzzy* masukan ke himpunan *fuzzy* keluaran.
- c *Fuzzy inference engine* menerjemahkan pernyataan-pernyataan *fuzzy* dalam *rule base* menjadi perhitungan matematika (*fuzzy combinational*). *Fuzzy Inference System* (FIS) dan merupakan bagian terpenting dalam logika *fuzzy*. Langkah yang dilakukan pada tahap ini adalah mengevaluasi aturan, dimana mengevaluasi aturan mempunyai arti mengolah dan menyimpulkan proses yang tersusun dari rule *IF...THEN*, dimana setiap *rule* menghasilkan satu keluaran. Pada dasarnya, satu *rule* akan aktif apabila kondisi masukan memenuhi aturan pernyataan *IF*. Pengaktifan aturan pernyataan *IF* menghasilkan *keluaran* kendali yang didasarkan pada aturan pernyataan *THEN*. Dalam sistem *fuzzy* digunakan banyak *rule* yang menyatakan satu atau lebih pernyataan *IF*. Suatu *rule* dapat pula mempunyai beberapa kondisi masukan, yang satu sama lainnya dihubungkan dengan *AND* atau *OR* untuk mendapatkan *rule* keluaran.
- d *Defuzzifier* berfungsi untuk mentransformasikan kesimpulan tentang aksi atur yang bersifat *fuzzy* menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat *crisp* dengan menggunakan operator

defuzzifikasi. Bentuk umum proses defuzzifikasi dinyatakan dengan:

$$Z_0 = \text{defuzzier}(z)$$

dimana z adalah aksi pengendalian *fuzzy*, Z_0 adalah aksi pengendali *crisp*, dan *defuzzifier* adalah operator defuzzifikasi.

Terdapat dua macam metode defuzzifikasi, yaitu :

- Metode Titik Pusat (Center Of Area, COA).
Dalam menerapkan kendali logika *fuzzy*, metode defuzzifikasi yang sering digunakan adalah *mean of maximum* dan *center of area*. Fungsinya ditunjukkan sebagai berikut :

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i H_i W_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i H_i} \quad (2.48)$$

Metode ini membagi dua momen pertama fungsi keanggotaan, dan harga v_0 yang menandai garis pembagi adalah harga V yang terdefuzzifikasi.

Secara algoritmik dinyatakan :

$$v_0 = \frac{\int_v v \mu_v(v) dv}{\int_v \mu_v(v) dv} \quad (2.49)$$

sedangkan dalam semesta diskrit dapat dinyatakan :

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \quad (2.50)$$

- Metode Titik Tengah Maksimum (*Mean Of Maximum*)
Merupakan metode defuzzifikasi yang merepresentasikan nilai titik tengah dari keluaran yang fungsi anggotanya maximum. Fungsinya ditunjukkan sebagai:

$$z_0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{l} \quad (2.51)$$

dimana z_i adalah nilai pendukung dengan fungsi keanggotaan bernilai maximum dan l adalah banyaknya nilai pendukung.

2.7 Standard IMO untuk Kemampuan Manuver Kapal

Standard untuk kemampuan manuver pada kapal (*ship manoeuvrability*) ditetapkan melalui peraturan IMO Resolusi MSC.137(76) pada 4 Desember 2002. Standard kemampuan manuver pada kapal ini digunakan untuk evaluasi dari kemampuan performansi manuver pada kapal. Standard ini harus diterapkan pada kapal dengan semua jenis *rudder* dan propulsi, panjang minimum 100 meter atau lebih, dan kapal tanker bahan kimia dan tanker pengangkut gas tanpa memperhatikan panjangnya.

Kemampuan manuver pada kapal dianggap memuaskan apabila memenuhi kriteria sebagai berikut ini.

a *Turning ability*

Gerak maju tidak lebih dari 4,5 kali panjang kapal (L) dan *tactical diameter* nya tidak lebih dari 5 kali panjang kapal pada saat manuver berputar melingkar.

b *Initial turning ability*

Dengan diberikan sudut 10° sudut *rudder* ke bagian kiri atau kanan kapal, kapal tidak boleh berjalan lebih dari 2,5 kali panjang kapal pada saat *heading* telah berubah sebesar 10° dari sudut *heading* awal.

c *Yaw-checking and course-keeping abilities*

- Nilai dari sudut *overshoot* pertama pada saat uji zig-zag sudut $10^\circ/10^\circ$ harus kurang dari:

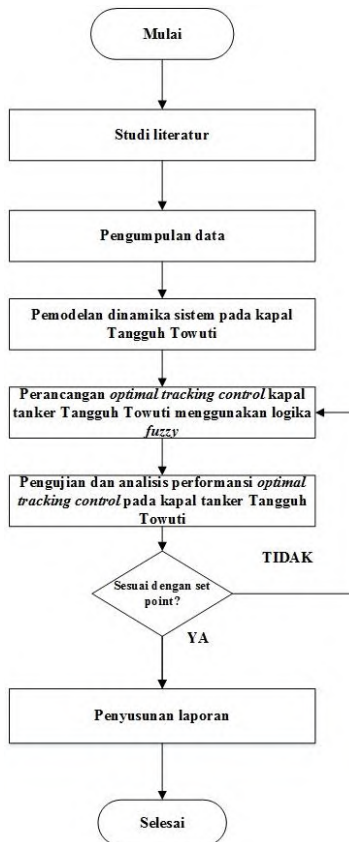
- 10° jika L/V kurang dari 10 detik.
- 20° jika L/V 30 detik atau lebih.
- $(5+0,5(L/V))$ derajat jika L/V lebih dari 10 detik tetapi kurang dari 30 detik.
- Nilai dari sudut *overshoot* kedua pada saat uji zig-zag sudut $10^\circ/10^\circ$ harus kurang dari:
 - 25° jika L/V kurang dari 10 detik.
 - 40° jika L/V 30 detik atau lebih.
 - $(17,5+0,75(L/V))$ derajat jika L/V lebih dari 10 detik tetapi kurang dari 30 detik.

Dengan nilai L adalah panjang kapal (m) dan V adalah kecepatan kapal (m/s)
- Nilai dari sudut *overshoot* pertama pada saat uji zig-zag sudut $20^\circ/20^\circ$ harus kurang dari 25°

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Tugas akhir ini dilakukan tahapan penyelesaian permasalahan yang telah dirumuskan dan untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Tahapan yang dilakukan tersebut ditampilkan pada sebuah *flowchart*. Gambar 3.1 di bawah ini ditampilkan *flowchart* penelitian.



Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan cara melakukan pemahaman secara teoretis terhadap materi pada penelitian tugas akhir ini, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Pemahaman mengenai model dinamika kapal

Studi literatur mengenai model dinamika kapal dilakukan dengan mempelajari penurunan model dinamika kapal yang diturunkan dari besaran fisis kapal tersebut. Model matematis didapatkan melalui pendekatan Nomoto (1957) dengan bentuk model matematis orde dua. Selain model dinamika kapal, juga diperlukan pemodelan matematis terhadap aktuator kapal berupa *rudder*.

2. Pemahaman mengenai *fuzzy logic control*

Fuzzy logic control sebagai logika kendali utama pada tugas akhir ini perlu dilakukan studi secara mendalam agar didapatkan sistem pengendalian yang tepat dan dapat diterapkan pada tugas akhir ini. Studi literatur mengenai *fuzzy logic control* termasuk didalamnya adalah mempelajari sistem *fuzzy logic* secara keseluruhan, mempelajari *rule base*, serta operasi matematis yang ada pada *fuzzy logic control*.

3. Pemahaman mengenai *optimal tracking control*

Studi literatur mengenai *optimal tracking control* dilakukan dengan mempelajari algoritma Filter Kalman sebagai *tools* utama untuk mendapatkan *optimal control*. Sedangkan untuk mendapatkan *optimal tracking control* dilakukan dengan membandingkan keluaran dari *fuzzy* dengan keluaran yang telah difilter pada Filter Kalman.

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data spesifikasi dari kapal tanker Tangguh Towuti dan data jalur pelayaran di pelabuhan Arun. Data spesifikasi kapal tanker Tangguh Towuti ditampilkan pada tabel 3.1. Data spesifikasi kapal

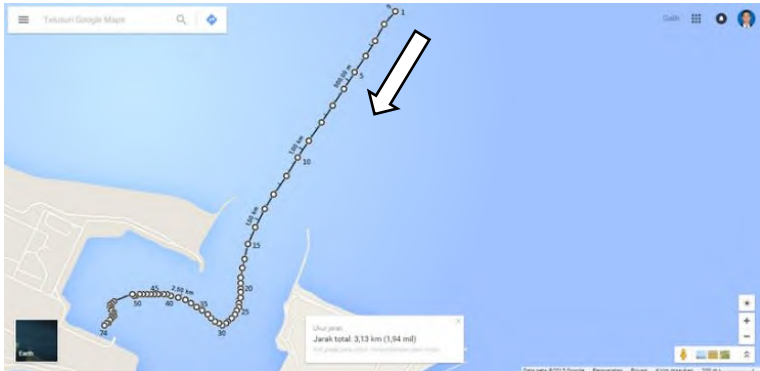
tanker Tangguh Towuti ini terdiri dari besaran besaran fisik dari kapal tersebut. Sedangkan untuk data jalur pelayaran ditampilkan pada Lampiran C.

Tabel 3.1 Spesifikasi kapal tanker Tangguh Towuti		
No.	Besaran	Nilai
1	Lpp (panjang)	274.4 m
2	U (kecepatan)	19.65 knot
3	B (lebar)	43.4 m
4	T (tinggi)	26.0 m
5	C_B (koefisien blok)	0.7561
6	XG (<i>specific gravity</i>)	0
7	A_δ (luasan <i>rudder</i>)	63,41 m ²
8	m (<i>displacement</i>)	112887.4 ton
9	R (jari jari girasi)	0.2Lpp
10	m' (massa <i>non dimensional</i>)	0,0097
11	XG' (<i>specific gravity non dimensional</i>)	0

Data jalur pelayaran pelabuhan Arun merupakan data titik koordinat *latitude* dan *longitude* jalur pelayaran dengan satuan derajat lintang dan bujur, yang kemudian dikonversikan menjadi satuan kilometer dengan dikalikan 111,32 km.

Data spesifikasi kapal akan digunakan sebagai masukan pada penentuan fungsi transfer kapal tanker, sedangkan data jalur pelayaran digunakan sebagai lintasan atau *trajectory* kapal tanker Tangguh Towuti. Plot grafik dari data jalur pelayaran di Lampiran

C akan ditampilkan pada gambar 3.2 berupa gambar jalur laut beserta dengan letak koordinatnya.



Gambar 3.2 Jalur pelayaran di pelabuhan Arun

Gambar 3.2 di atas merupakan jalur pelayaran di pelabuhan Arun yang ditandai dengan titik putih berjumlah 74 titik. Jalur pelayaran di pelabuhan Arun untuk kapal masuk ke pelabuhan dimulai pada titik nomor 1 yang berada di lautan lepas, kemudian mengikuti arah panah hingga ke titik nomor 74 yang merupakan tempat sandar kapal.

3.3 Pemodelan Sistem Hidrodinamika Kapal

Pemodelan sistem dilakukan untuk merancang model matematis dari kapal tanker Tangguh Towuti. Pemodelan matematis kapal tanker Tangguh Towuti didapatkan dari pendekatan yang dilakukan Nomoto (1957) sebagai persamaan matematis orde 2 seperti pada persamaan 2.3.

Data spesifikasi kapal selanjutnya digunakan untuk mendapatkan koefisien hidrodinamika kapal dengan menggunakan regresi Clarke pada persamaan 2.12 – 2.23. Dari hasil perhitungan, diperoleh nilai koefisien hidrodinamika sebagai berikut ini. Perhitungan koefisien hidrodinamika dapat dilihat pada lampiran.

$$Y'_v = -0,03028704$$

$$Y'_\dot{r} = -0,002728155$$

$$N'_v = -0,002975294$$

$$N'_\dot{r} = -0,001482705$$

$$Y'_v = -0,042422775$$

$$Y'_r = 0,008050722$$

$$N'_v = -0,02050617$$

$$N'_r = -0,006386032$$

$$Y'_\delta = 0,00697702$$

$$N'_\delta = -0,00348851$$

$$I'_z = 0,03120639$$

$$I'_r = 0,03120639$$

Nilai nilai koefisien hidrodinamika kapal yang didapatkan dimasukkan sebagai elemen matriks pada persamaan 2.8. Elemen matriks ini digunakan untuk menyusun persamaan model matematis Nomoto.

$$M = \begin{bmatrix} 0,030296618 & 0,00272815 \\ 0,002975294 & 0,03268909 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 0,042422775 & -0,0080507 \\ 0,02050617 & 0,00638603 \end{bmatrix}$$

$$\det M = 1,94344645$$

$$\det N = 0,001170771$$

$$T_1 T_2 = 1659,971472$$

$$T_1 + T_2 = 96,39053727$$

$$K_R = 24,93757238$$

$$K_R T_3 = 294,0785031$$

$$T_3 = 11,79258745$$

Dari elemen matriks di atas, maka persamaan model matematis Nomoto orde dua kapal tanker Tangguh Towuti sesuai dengan persamaan 2.3 didapatkan sebagai berikut ini.

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{24,93757 + 294,0785s}{s + 96,39054s^2 + 1659,971s^3}$$

3.4 Pemodelan Gangguan Angin

Pemodelan gangguan angin dilakukan dengan menggunakan persamaan Isherwood (1972). Perhitungan dilakukan untuk mendapatkan gaya angin yang bekerja pada kapal tanker sesuai dengan persamaan 2.28 – 2.33. Pemodelan gangguan angin dilakukan dengan tiga variasi sudut datang angin (γ_R), yaitu pada sudut 20°, 30°, dan 40°. Tahapan pemodelan gangguan angin yang bekerja pada kapal tanker adalah sebagai berikut. Perhitungan pemodelan gangguan angin ditampilkan pada Lampiran E.

- Tahap 1

Menentukan nilai koefisien gaya dan momen angin menggunakan persamaan 2.31 – 2.33. Sehingga didapatkan nilai koefisien gaya dan momen angin yang ditampilkan pada tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Koefisien gaya dan momen angin

Koefisien	Sudut datang angin		
	20°	30°	40°
C_X	-8,51285	-14,1546	-16,9381
C_Y	0,248144	0,371473	0,501703
C_N	0,046329	0,060695	0,012137

Tabel 3.2 di atas menampilkan nilai koefisien gaya dan momen angin pada sudut datang yang ditentukan. Nilai koefisien gaya dan momen angin tersebut dimasukkan ke persamaan 2.28-2.30 untuk mendapatkan besar gaya dan momen angin yang bekerja pada kapal.

- Tahap 2

Menentukan nilai gaya dan momen angin menggunakan persamaan 2.28 – 2.30. Nilai gaya dan momen angin ditampilkan pada tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.3 Besar gaya dan momen angin

Gaya dan momen	Sudut datang angin		
	20°	30°	40°
X_w	-157500	-261881	-313379
Y_w	30190,74	45195,65	61040,21
N_w	1608697	2107538	421424,3

Tabel 3.3 di atas menampilkan besar gaya dan momen angin yang bekerja pada kapal sesuai dengan sudut datang angin.

- Tahap 3

Mengubah gaya dan momen angin menjadi *non dimensional*. Untuk gaya dibagi dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^2$, dan untuk momen dibagi dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^3$. Hal ini disesuaikan dengan aturan normalisasi *Prime system I* (Fossen, 1994).

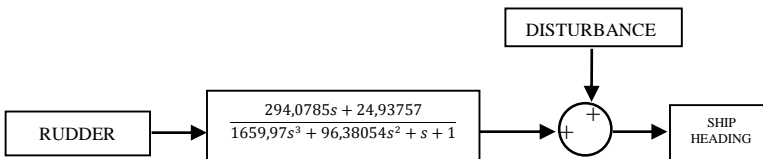
Tabel 3.4 Nilai gaya dan momen angin dalam *non dimensional*

Gaya dan momen angin	sudut datang angin		
	20°	30°	40°
X_w'	-7,91746E-05	-0,00013165	-0,00015753
Y_w'	5,53089E-08	8,27977E-08	1,11825E-07
N_w'	2,94711E-06	3,86097E-06	7,72042E-07

Tabel 3.4 menampilkan besar gaya dan momen angin dalam bentuk *non dimensional*. Nilai pada tabel 3.4 ini yang selanjutnya dimasukkan ke dalam blok Simulink sistem secara keseluruhan.

- Tahap 4

Memasukkan nilai gaya dan momen angin ke dalam blok Simulink. Pada tahap ini nilai gaya dan momen yang didapatkan dari perhitungan dimasukkan kedalam blok diagram Simulink sebagai *disturbance*.

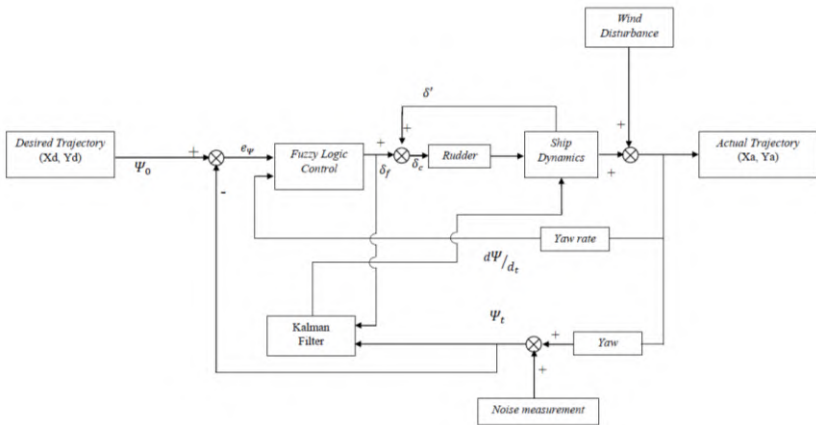


Gambar 3.3 Blok masukan dan keluaran *plant* kapal dengan *disturbance*

Gambar 3.3 di atas menampilkan blok *disturbance* untuk memasukkan nilai gaya dan momen akibat hembusan angin dalam bentuk *non dimension*.

3.5 Perancangan *Optimal Tracking Control*

Perancangan kendali *optimal tracking* kapal tanker Tangguh Towuti dilakukan dengan menggunakan kendali logika *fuzzy*. Berikut ini diagram blok sistem secara keseluruhan ditampilkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram blok sistem pengendalian

Gambar 3.4 di atas menampilkan blok diagram sistem pengendalian, dengan *fuzzy logic controller* memiliki dua masukan, yaitu *error yaw* dan *yaw rate*. Kedua masukan ini digunakan sebagai logika masukan yang akan diproses di *fuzzy logic controller*. Keluaran dari *fuzzy logic controller* berupa sinyal kendali δ_f . Sinyal keluaran dari *fuzzy logic controller* akan dibandingkan lagi dengan keluaran dari Kalman Filter berupa sinyal kendali δ' . Sinyal kendali hasil perbandingan keduanya adalah δ_c yang digunakan untuk menggerakkan aktuator berupa *rudder*.

Perancangan kendali kapal menggunakan *fuzzy logic control* dilakukan melalui FIS (*fuzzy inference system*) editor pada Matlab. Masukan pengendali logika *fuzzy* adalah *error yaw* dan *yaw rate*, dengan keluaran dari logika *fuzzy* berupa sudut *rudder*. Metode pengambilan keputusan yang digunakan adalah metode Sugeno.

3.6 Kendali Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* adalah suatu metode logika yang memungkinkan nilai suatu keanggotaan berada di antara 0 dan 1. Dengan logika tersebut maka suatu sistem dapat memiliki nilai keanggotaan antara 0 hingga 1, hal ini lah yang membedakan *fuzzy* dengan logika boolean yang hanya mengizinkan nilai keanggotaannya 0 dan atau 1. Tentunya hal ini menjadikan logika *fuzzy* memiliki keunggulan tersendiri dibanding logika lainnya.

Hal ini pula yang menjadikan logika *fuzzy* dapat diterapkan pada pengendalian pergerakan kapal. Dimana logika *fuzzy* digunakan sebagai pengendali yang memberikan keluaran berupa besar sudut *rudder* yang diperlukan agar *heading* kapal dapat mencapai posisi yang diinginkan.

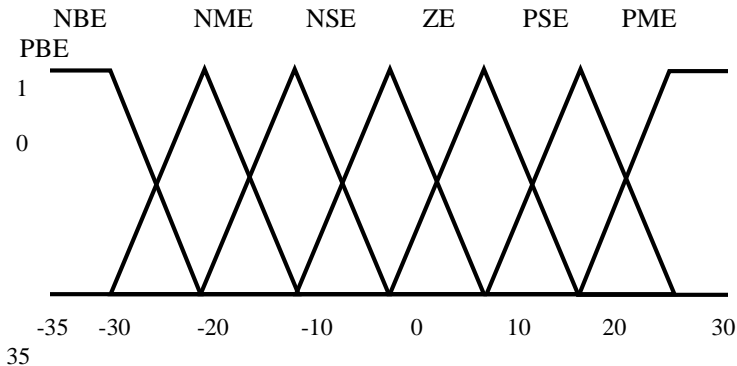
3.6.1 Fuzzifikasi

Pengendali logika *fuzzy* menggunakan dua masukan, diantaranya adalah *error yaw* dan *yaw rate*. Keluaran sistem kendali logika *fuzzy* adalah sudut *rudder* yang berfungsi untuk mengendalikan arah kapal menuju kea rah yang ditentukan. Berikut ini adalah proses fuzzifikasi sistem kendali kapal tanker Tangguh Towuti.



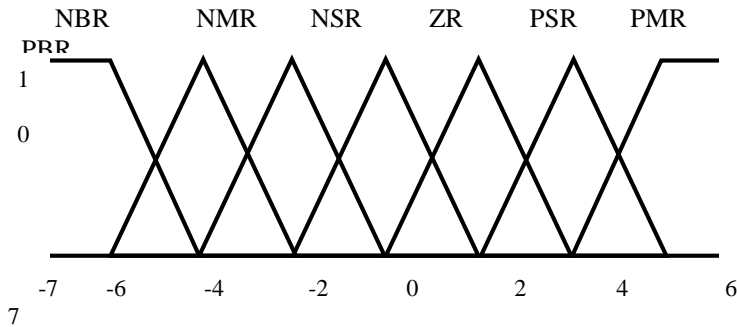
Gambar 3.5 Perancangan FIS sistem pengendalian kapal

Perancangan *Fuzzy Inference System* atau FIS pada Matlab ditampilkan pada gambar 3.5 di atas. Pada tampilan FIS terdapat hubungan antara input, basis aturan dan output dari sistem *fuzzy* yang dirancang.



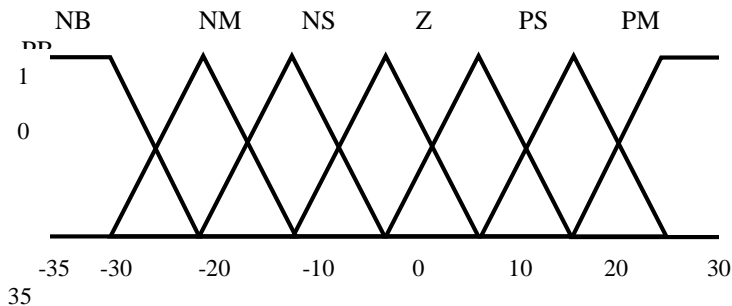
Gambar 3.6 Fungsi keanggotaan *error yaw* logika *fuzzy*

Gambar 3.6 menampilkan fungsi keanggotaan *error yaw* yang dijadikan sebagai masukan sistem *fuzzy* yang dirancang. *Range* fungsi keanggotaan masukan *fuzzy* diatur sebesar -35 hingga 35. Fungsi keanggotaan *error yaw* dibagi menjadi tujuh, yakni NBE, NME, NSE, ZE, PSE, PME dan PBE. Dimana PBE dan NBE diatur dengan tipe trapesium, sedangkan fungsi keanggotaan yang lainnya diatur dengan tipe segitiga.



Gambar 3.7 Fungsi keanggotaan *yaw rate* logika *fuzzy*

Gambar 3.7 menampilkan fungsi keanggotaan *yaw rate* yang dijadikan sebagai masukan sistem *fuzzy* yang dirancang. *Range* fungsi keanggotaan masukan *fuzzy* diatur sebesar -7 hingga 7. Fungsi keanggotaan *error yaw* dibagi menjadi tujuh, yakni NBR, NMR, NSR, ZR, PSR, PMR dan PBR. Dimana PBR dan NBR diatur dengan tipe trapesium, sedangkan fungsi keanggotaan yang lainnya diatur dengan tipe segitiga.



Gambar 3.8 Fungsi keanggotaan keluaran logika *fuzzy*

Fungsi keanggotaan keluaran sistem *fuzzy* kendali kapal tanker ditampilkan pada gambar 3.8 di atas. Dimana fungsi keanggotaannya dibagi menjadi tujuh, yakni NB, NM, NS, Z, PS, PM dan PB. Nilai keluaran sistem *fuzzy* diatur sama dengan tipe

pada input *error yaw*. Keluaran sistem *fuzzy* merupakan sinyal kendali kepada *rudder* untuk selanjutnya akan mempengaruhi pergerakan kapal.

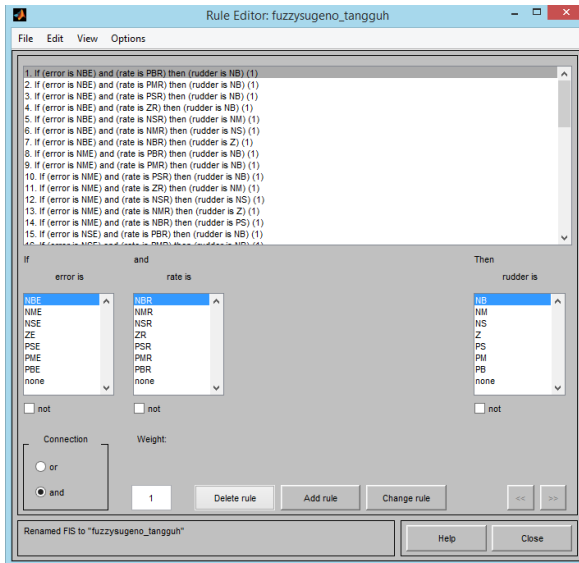
3.6.2 Basis Aturan (*Rule Base*)

Basis aturan atau *rule base* adalah kumpulan aturan pengendali logika *fuzzy* yang dibangun berdasarkan logika “*if-then*” untuk menyatakan hubungan antara masukan dan keluaran sistem agar tujuan dari pengendalian dapat dicapai. Berikut ini adalah basis aturan atau *rule base* untuk sistem pengendalian kapal berbasis logika *fuzzy*. Basis aturan untuk kendali kapal tanker Tangguh Towuti ditampilkan pada tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.5 Basis aturan logika <i>fuzzy</i>							
r/e	NBE	NME	NSE	ZE	PSE	PME	PBE
PBR	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
PMR	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
PSR	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
ZR	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NSR	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
NMR	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
NBR	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Tabel 3.5 menjelaskan tentang basis aturan hubungan input output logika *fuzzy* sebagai logika yang digunakan untuk mengendalikan kapal. Tabel ini lah yang dijadikan sebagai dasar

penentuan hubungan *if-then* pada *rule base* logika *fuzzy*. Gambar 3.9 di bawah ini merupakan *rule editor* dari sistem *fuzzy* yang dibuat.



Gambar 3.9 Tampilan *Rule editor* logika *fuzzy*

Setelah membuat basis aturan, maka aturan - aturan tersebut dimasukkan kedalam *rule editor* seperti gambar 3.8 di atas. Pada *rule editor*, hubungan antara masukan dan keluaran sistem dapat diatur satu persatu sesuai dengan basis aturan yang telah dibuat pada tabel 3.5. Dan secara otomatis fungsi “*if-then*” akan muncul di kolom atas tampilan *rule editor*.

Algoritma *fuzzy* meliputi aturan sebagai berikut ini:

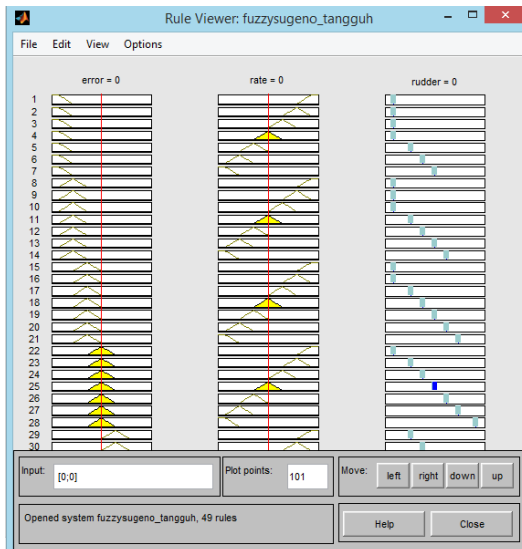
1. If (error is NBE) and (rate is PBR) then (Rudder is NB) (1)
2. If (error is NBE) and (rate is PMR) then (Rudder is NB) (1)
3. If (error is NBE) and (rate is PSR) then (Rudder is NB) (1)
4. If (error is NBE) and (rate is ZR) then (Rudder is NB) (1)
5. If (error is NBE) and (rate is NSR) then (Rudder is NM) (1)
6. If (error is NBE) and (rate is NMR) then (Rudder is NS) (1)

7. If (error is NBE) and (rate is NBR) then (Rudder is Z) (1)
8. If (error is NME) and (rate is PBR) then (Rudder is NB) (1)
9. If (error is NME) and (rate is PMR) then (Rudder is NB) (1)
10. If (error is NME) and (rate is PSR) then (Rudder is NB) (1)
11. If (error is NME) and (rate is ZR) then (Rudder is NM) (1)
12. If (error is NME) and (rate is NSR) then (Rudder is NS) (1)
13. If (error is NME) and (rate is NMR) then (Rudder is Z) (1)
14. If (error is NME) and (rate is NBR) then (Rudder is PS) (1)
15. If (error is NSE) and (rate is PBR) then (Rudder is NB) (1)
16. If (error is NSE) and (rate is PMR) then (Rudder is NB) (1)
17. If (error is NSE) and (rate is PSR) then (Rudder is NM) (1)
18. If (error is NSE) and (rate is ZR) then (Rudder is NS) (1)
19. If (error is NSE) and (rate is NSR) then (Rudder is Z) (1)
20. If (error is NSE) and (rate is NMR) then (Rudder is PS) (1)
21. If (error is NSE) and (rate is NBR) then (Rudder is PM) (1)
22. If (error is ZE) and (rate is PBR) then (Rudder is NB) (1)
23. If (error is ZE) and (rate is PMR) then (Rudder is NM) (1)
24. If (error is ZE) and (rate is PSR) then (Rudder is NS) (1)
25. If (error is ZE) and (rate is ZR) then (Rudder is Z) (1)
26. If (error is ZE) and (rate is NSR) then (Rudder is PS) (1)
27. If (error is ZE) and (rate is NMR) then (Rudder is PM) (1)
28. If (error is ZE) and (rate is NBR) then (Rudder is PB) (1)
29. If (error is PSE) and (rate is PBR) then (Rudder is NM) (1)
30. If (error is PSE) and (rate is PMR) then (Rudder is NS) (1)
31. If (error is PSE) and (rate is PSR) then (Rudder is Z) (1)
32. If (error is PSE) and (rate is ZR) then (Rudder is PS) (1)
33. If (error is PSE) and (rate is NSR) then (Rudder is PM) (1)
34. If (error is PSE) and (rate is NMR) then (Rudder is PB) (1)
35. If (error is PSE) and (rate is NBR) then (Rudder is PB) (1)
36. If (error is PME) and (rate is PBR) then (Rudder is NS) (1)
37. If (error is PME) and (rate is PMR) then (Rudder is Z) (1)
38. If (error is PME) and (rate is PSR) then (Rudder is PS) (1)
39. If (error is PME) and (rate is ZR) then (Rudder is PM) (1)
40. If (error is PME) and (rate is NSR) then (Rudder is PB) (1)
41. If (error is PME) and (rate is NMR) then (Rudder is PB) (1)
42. If (error is PME) and (rate is NBR) then (Rudder is PB) (1)

43. If (error is PBE) and (rate is PBR) then (Rudder is Z) (1)
44. If (error is PBE) and (rate is PMR) then (Rudder is PS) (1)
45. If (error is PBE) and (rate is PSR) then (Rudder is PM) (1)
46. If (error is PBE) and (rate is ZR) then (Rudder is PB) (1)
47. If (error is PBE) and (rate is NSR) then (Rudder is PB) (1)
48. If (error is PBE) and (rate is NMR) then (Rudder is PB) (1)
49. If (error is PBE) and (rate is NBR) then (Rudder is PB) (1)

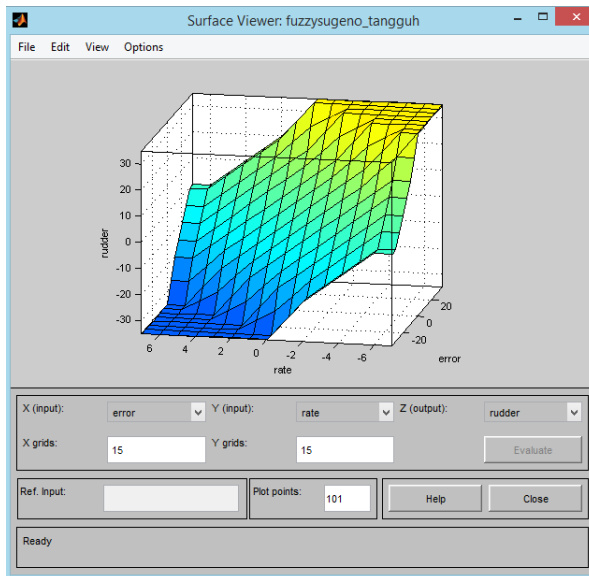
3.6.3 Inferensi Fuzzy

Inferensi *fuzzy* adalah suatu proses pembentukan pemetaan dari input yang diberikan menjadi output yang diinginkan dari logika *fuzzy*. Proses inferensi *fuzzy* ini merupakan proses untuk mendapatkan keluaran berupa sinyal kendali dari logika *fuzzy* untuk menggerakkan *rudder* berdasarkan basis aturan yang telah dibuat pada tabel 3.5.



Gambar 3.10 Proses inferensi logika *fuzzy*

Rule viewer di atas akan muncul secara otomatis pada saat Simulink dari program dijalankan. *Rule viewer* tersebut akan bergerak mengikuti aturan yang telah dibuat. *Rule base* logika fuzzy sistem pengendalian kapal tanker juga dapat ditampilkan dalam sebuah *surface viewer*. Berikut pada gambar 3.11 adalah tampilannya.



Gambar 3.11 *Surface viewer* logika fuzzy

Gambar 3.11 menampilkan *surface viewer* dari sistem logika fuzzy yang telah dibuat. Grafik tiga dimensi *surface viewer* tersebut merepresentasikan hubungan antara masukan (*error yaw* dan *yaw rate*) dengan keluaran (sudut *rudder*). Dimana warna warna pada grafik *surface viewer* memberikan keterangan seberapa besar sudut *rudder* akan terbuka. Dengan urutan dari yang terkecil hingga terbesar sesuai urutan warna: biru, biru muda, hijau, kuning. Bentuk tiga dimensi grafik *surface viewer* terbentuk berdasarkan basis aturan yang diterapkan pada FIS.

3.6.4 Defuzzifikasi

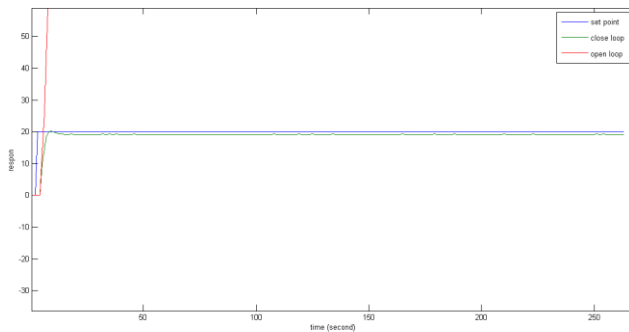
Defuzzifikasi adalah suatu proses pengubahan setiap hasil dari inferensi *fuzzy set* pada *inference engine* menjadi bentuk data *crisp*. Proses ini diperlukan karena aktuator yang dikendalikan hanya dapat menerima masukan berupa besaran real dari pengendali untuk melakukan proses berikutnya. Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode centroid. Metode centroid ini juga dikenal sebagai metode COA (Center of Area) atau metode Center of Gravity. Pada metode ini nilai crisp keluarannya diperoleh berdasarkan titik berat dari kurva hasil proses pengambilan keputusan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

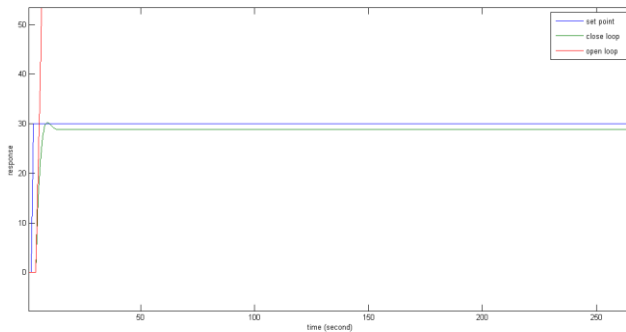
4.1 Pengujian *Open Loop* dan *Close Loop* Dinamika Kapal

Pengujian dinamika kapal tanker Tangguh Towuti secara *open loop* dilakukan untuk mengetahui respon dinamik kapal terhadap waktu dan sudut *heading* tanpa menggunakan pengendali. Sedangkan uji *close loop* dilakukan untuk mengetahui respon dinamik kapal tanker Tangguh Towuti apabila diberikan pengendali.

Uji *open loop* dan *close loop* dilakukan terhadap model matematis kapal dan diagram blok yang telah dibuat dengan diberikan masukan sinyal *step* sebesar 20° dan 30° . Penggunaan sudut tersebut memenuhi uji *turning* yang telah ditetapkan oleh IMO (*International Maritime Organization*). Grafik respon sistem ditampilkan pada gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4.1 Grafik respon *open loop* dan *close loop* untuk sudut *rudder* 20°



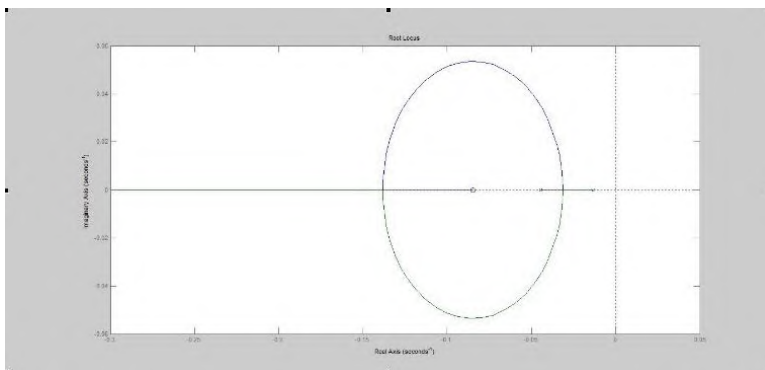
Gambar 4.2 Grafik respon *open loop* dan *close loop* untuk sudut *rudder* 30°

Uji *open loop* untuk sudut 20° menghasilkan respon sudut *heading* yang terus meningkat dan melebihi *set point* setelah 6,31 detik. Sedangkan untuk uji *open loop* sudut 30° menghasilkan respon sudut *heading* yang juga terus meningkat. Hal ini dikarenakan tidak ada pengendali yang dapat mempertahankan nilai respon agar tetap *steady*.

Untuk uji *close loop* baik untuk sudut 20° maupun 30° sama-sama menghasilkan respon sudut *heading* yang mencapai *set point* setelah 18,4 detik. Kedua sudut masukan juga menghasilkan *overshoot* sebesar 1%. Dan mempertahankan respon yang stabil setelah 63 detik. Namun keduanya memiliki *error steady state* sebesar masing-masing 3,85% dan 3,83%. Hal ini berarti bahwa penggunaan pengendali dapat memberikan respon yang stabil pada sistem, tetapi sistem tidak dapat tepat pada *set point* yang telah ditentukan sebelumnya.

4.2 Pengujian Kestabilan Kapal Menggunakan *Root Locus*

Pengujian kestabilan kapal tanker Tangguh Towuti dengan metode *root locus* dilakukan pada Matlab. Uji kestabilan *root locus* dilakukan untuk mengetahui sejauh mana sistem akan tetap stabil apabila diberikan pengendali proporsional.



Gambar 4.3 Hasil uji kestabilan *root locus*

Dari uji kestabilan *root locus* diketahui bahwa nilai akar akarnya ada di sebelah kiri sumbu imajiner. Hal ini mengindikasikan bahwa berapapun nilai gain pengendali $K > 0$ maka respon model matematis kapal tanker Tangguh Towuti akan tetap stabil.

4.3 Validasi Koefisien Hidrodinamika

Validasi koefisien hidrodinamika dilakukan dengan membandingkan nilai koefisien hidrodinamika kapal tanker Tangguh Towuti dengan nilai koefisien hidrodinamika pada jurnal berjudul “*Estimation of Ship Maneuvering Characteristic in the Conceptual Design Stage*”. Validasi koefisien hidrodinamika dilakukan dengan menggunakan jenis kapal yang sama, yakni kapal tanker. Tabel 4.1 berikut akan menampilkan perbandingan nilai koefisien hidrodinamika kapal.

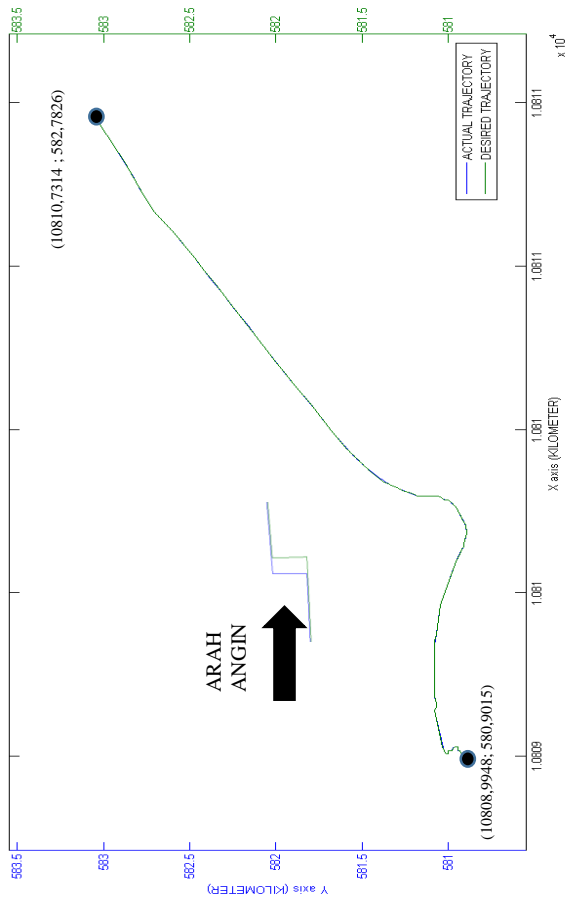
Tabel 4.1 Validasi koefisien hidrodinamika

No	Koefisien	Tangguh Towuti	Jurnal	Error
1	Y'_v	-0,03028	-0,02013	-0,01016
2	Y'_r	-0,00272	-0,00232	-0,00041
3	N'_v	-0,00297	-0,00242	-0,00056
4	N'_r	-0,00148	-0,00082	-0,00066
5	Y'_v	-0,04242	-0,03378	-0,00864
6	Y'_r	0,00805	0,00456	0,003491
7	N'_v	-0,02051	-0,01305	-0,00746
8	N'_r	-0,00638	-0,00450	-0,00189
9	Y'_δ	0,00697	0,00527	0,001707
10	N'_δ	-0,00348	-0,00263	-0,00086

Tabel 4.1 di atas menampilkan perbedaan nilai antara koefisien hidrodinamika kapal tanker Tangguh Towuti dengan jurnal kecil dan berada pada orde yang sama. Dengan nilai error terbesar adalah 0,01016 dan nilai error terkecil adalah 0,00041. Error nilai koefisien hidrodinamika yang kecil tersebut menunjukkan bahwa koefisien hidrodinamika kapal tanker Tangguh Towuti hasil perhitungan dianggap valid.

4.4 Pengujian Performansi Sistem *Tracking Control* Kapal Tanker Tangguh Towuti Tanpa Gangguan

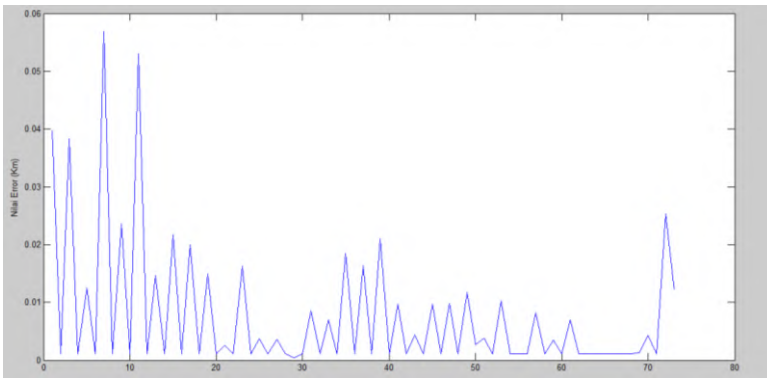
Pengujian performansi sistem *tracking control* kapal tanker Tangguh Towuti dilakukan untuk mengetahui respon dinamik dari sistem pengendalian yang telah dibuat. Uji performansi ini dilakukan dengan memasukan set point berupa koordinat jalur pelayaran di pelabuhan Arun yang telah diubah menjadi koordinat xy. Berikut ini adalah hasil simulasi sistem pengendalian haluan kapal tanker Tangguh Towuti.



Gambar 4.4 Lintasan aktual dan *desired* kapal tanker Tangguh Towuti tanpa gangguan

Gambar 4.4 adalah grafik hasil simulasi sistem pengendalian haluan kapal dengan menggunakan logika *fuzzy* sebagai

pengendalinya. Simulasi yang dilakukan didapatkan hasil bahwa sistem yang telah dibuat dapat mengikuti jalur lintasan *desired* yang dijadikan sebagai set point. Tetapi antara aktual *trajectory* dengan *desired trajectory* masih terdapat error lintasan. Hal ini dapat diketahui dengan memperbesar grafik hasil respon, seperti pada gambar 4.4 di atas. Sedangkan untuk nilai error dari sistem *tracking control* ditampilkan pada gambar 4.5 berikut ini, dan untuk nilai lebih lengkapnya ditampilkan pada lampiran D.



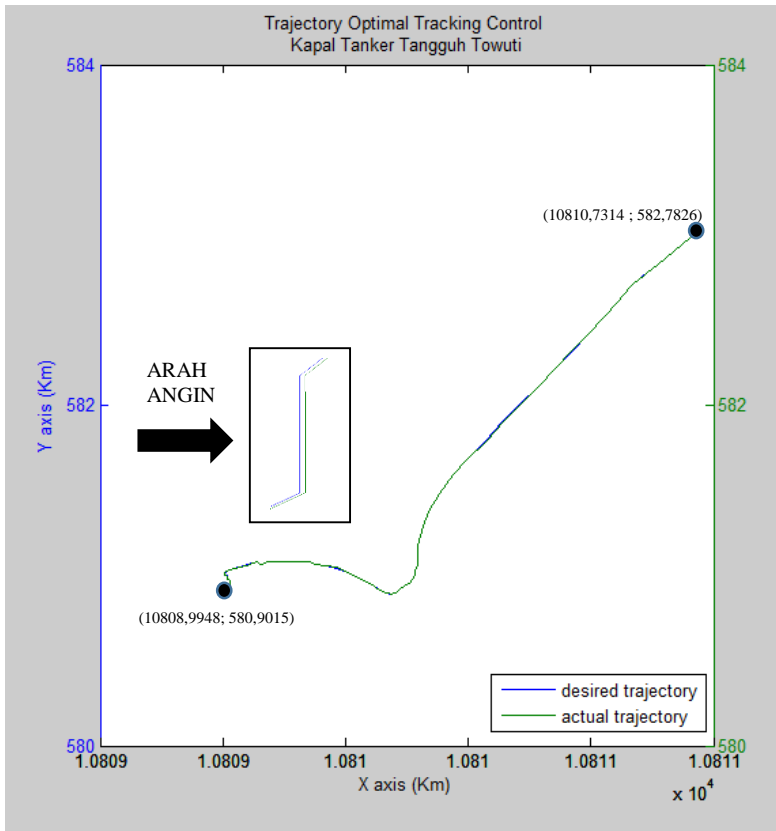
Gambar 4.5 Grafik nilai error simulasi *tracking control* tanpa gangguan

Simulasi yang dilakukan menghasilkan nilai error lintasan yang fluktuatif, dengan nilai terkecilnya adalah 0,45 meter dan yang terbesar bernilai 56,85 meter atau sebesar 0,2072Lpp.

4.5 Pengujian Performansi Sistem *Optimal Tracking Control* Kapal Tanker Tangguh Towuti Tanpa Gangguan

Sistem *optimal tracking control* diterapkan pada sistem kendali kapal tanker Tangguh Towuti untuk memperkecil nilai error antara jalur pelayaran yang telah ditentukan dengan lintasan *actual* yang dilewati oleh kapal. Perbedaan antara sistem *optimal tracking control* dengan sistem kendali yang telah dibuat sebelumnya yakni ditambahkan filter Kalman pada pengendali.

Uji performasi terhadap sistem *optimal tracking control* dilakukan sama seperti dengan sebelumnya, dengan memasukan set point berupa koordinat jalur pelayaran di pelabuhan Arun yang telah diubah menjadi koordinat xy. Berikut ini adalah hasil simulasi sistem *optimal tracking control* kapal tanker Tangguh Towuti.

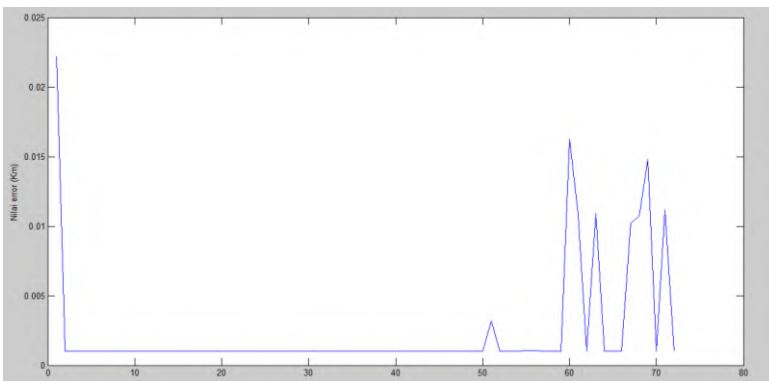


Gambar 4.6 Lintasan aktual dan *desired* kapal dengan sistem *optimal tracking control* tanpa gangguan

Gambar 4.6 menampilkan respon *trajectory* kapal dengan sistem *optimal tracking control* dapat mengikuti lintasan *desired*

yang diinginkan. Serta lintasan aktual hasil simulasi *optimal tracking control* lebih berimpit dengan lintasan *desired* dibandingkan dengan sistem *tracking control* sebelumnya.

Simulasi yang dilakukan juga mendapatkan hasil nilai error lintasan antara *desired trajectory* dengan *actual trajectory*. Berikut ini grafik nilai error lintasan *optimal tracking control* ditampilkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik nilai error simulasi *optimal tracking control* tanpa gangguan

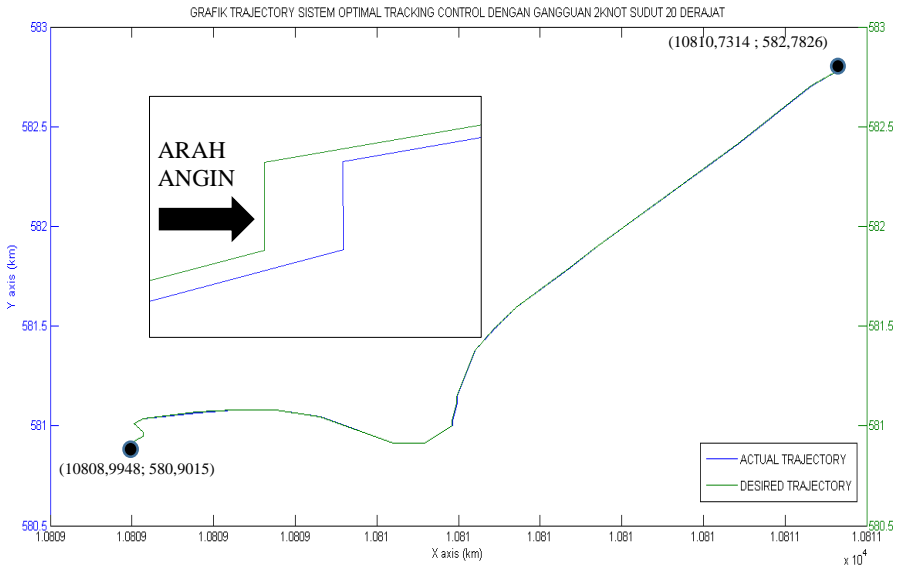
Gambar 4.7 di atas menunjukkan bahwa nilai error lintasan yang diperoleh dari simulasi sistem *optimal tracking control* dengan filter Kalman lebih baik daripada sistem *tracking control* tanpa filter Kalman. Nilai error stabil sebesar 1,028 meter, tetapi masih terdapat error yang fluktuatif di awal dan akhir simulasi. Namun nilai error ini masih lebih baik daripada simulasi tanpa filter Kalman, dikarenakan nilai error terbesarnya adalah 22,2 meter atau sebesar 0,080946 Lpp. Sedangkan untuk nilai error sistem tanpa filter Kalman error terbesarnya adalah 55,84 meter.

4.6 Pengujian Performansi Sistem *Optimal Tracking Control* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan Gangguan Angin

Pengujian sistem *optimal tracking control* pada kapal tanker Tangguh Towuti dilakukan dengan diberikan gangguan berupa gaya angin. Gaya angin diberikan kepada sistem kapal dengan sudut datang 20° , 30° dan 40° . Gaya angin yang bekerja pada kapal dihitung menggunakan persamaan 2.28 hingga 3.23, dengan diberikan kecepatan angin sebesar 2, 7 dan 15 knot sesuai dengan kondisi angin di pelabuhan Arun. Hal ini dilakukan untuk mengetahui performansi sistem *optimal tracking control* terhadap gangguan angin yang bekerja pada lambung kapal.

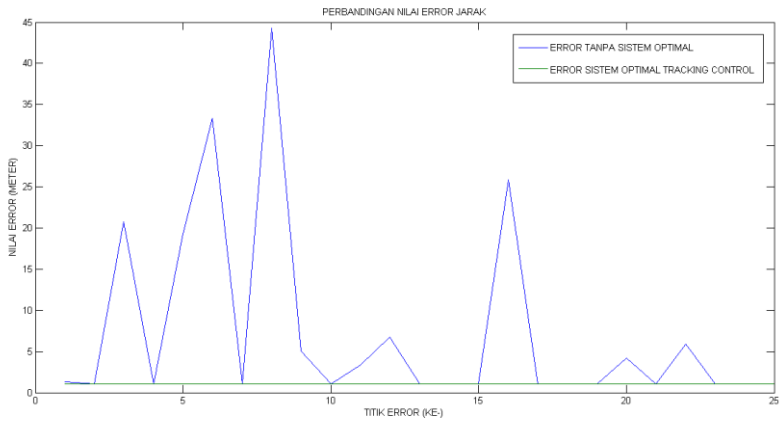
4.6.1 Pengujian sistem dengan Gangguan Angin sebesar 2 Knot

Pengujian sistem dengan gangguan angin sebesar 2 knot dilakukan dengan sudut datang angin sebesar 20° , 30° dan 40° . Data hasil simulasi ditampilkan pada tabel lampiran. Sedangkan untuk grafik error lintasan antara *desired* dan aktual *trajectory* beserta *trajectory* sistem ditampilkan pada gambar 4.8 dan 4.9.



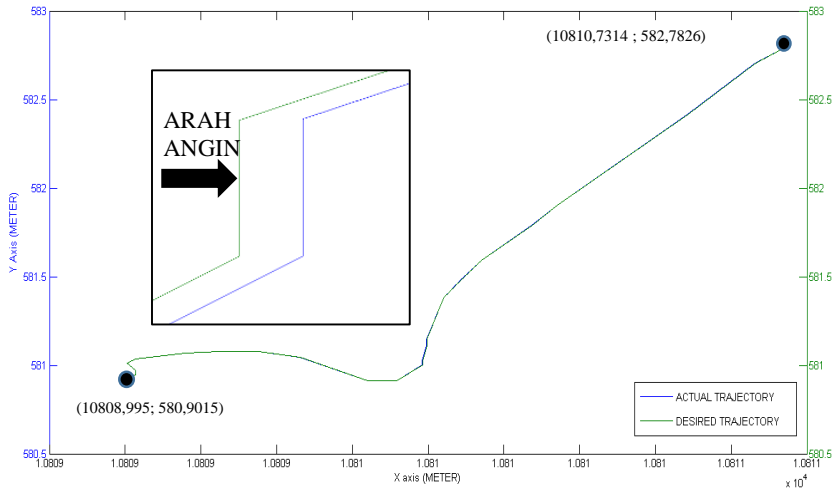
Gambar 4.8 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 2 knot sudut datang 20°

Gambar 4.8 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 2 knot arah sudut datang 20° . Sedangkan untuk nilai error jarak antara sistem tanpa *optimal control* dan yang menggunakan *optimal control* ditampilkan pada gambar 4.9 berikut.



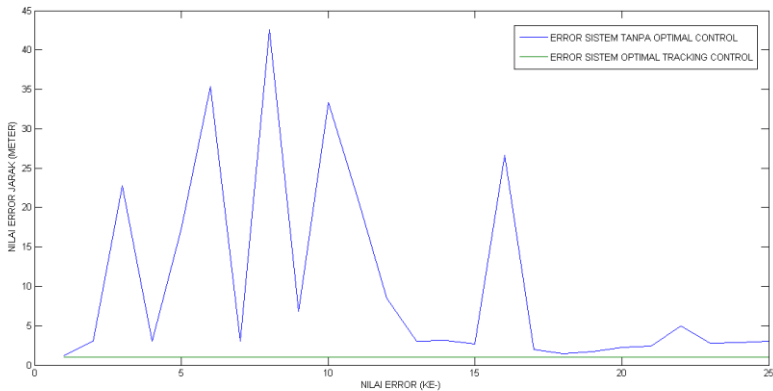
Gambar 4.9 Grafik error lintasan dengan gangguan angin 2 knot sudut 20°

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 44,3 meter dan bersifat fluktuatif. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 1,03 meter.



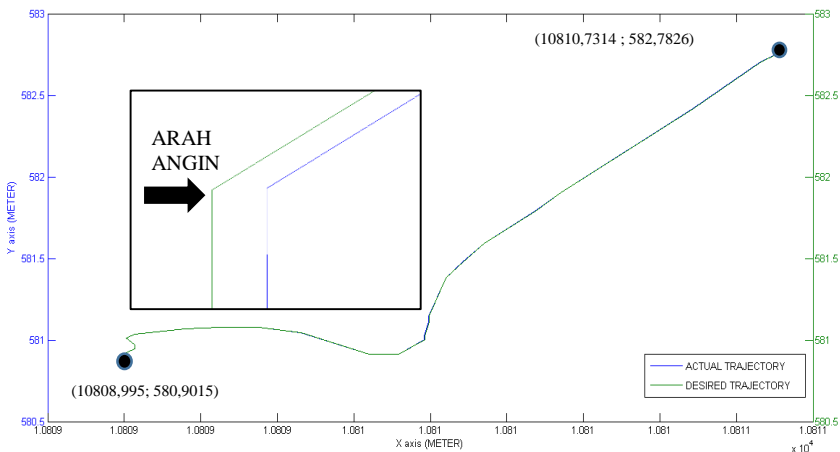
Gambar 4.10 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 2 knot sudut 30°

Gambar 4.10 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 2 knot arah sudut datang 30° . Nilai error jarak antara sistem tanpa *optimal control* dan yang menggunakan *optimal control* ditampilkan pada gambar 4.11 berikut.



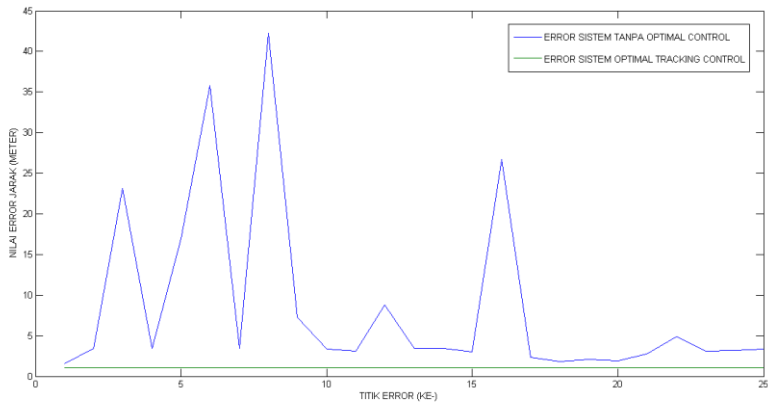
Gambar 4.11 Grafik error lintasan dengan gangguan angin 2 knot sudut 30°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 42,5 meter dan bersifat fluktuatif. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 1,03 meter.



Gambar 4.12 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 2 knot sudut 40°

Gambar 4.12 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 2 knot arah sudut datang 40° .

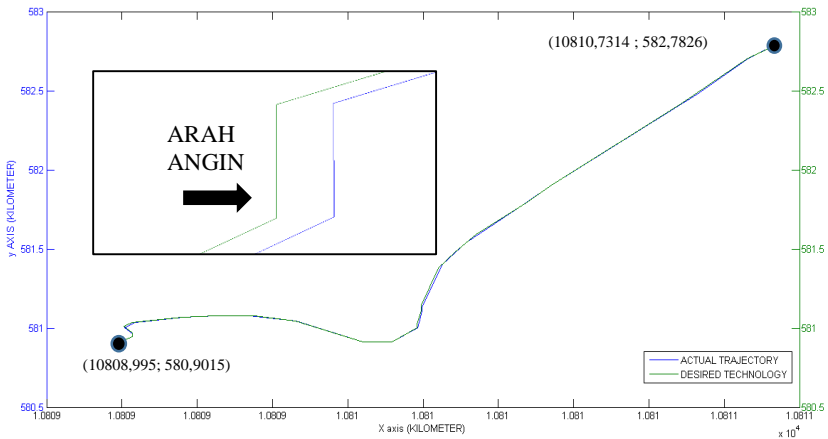


Gambar 4.13 Grafik error lintasan dengan gangguan angin 2 knot sudut 40°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 42,3 meter dan bersifat fluktuatif. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 1,03 meter.

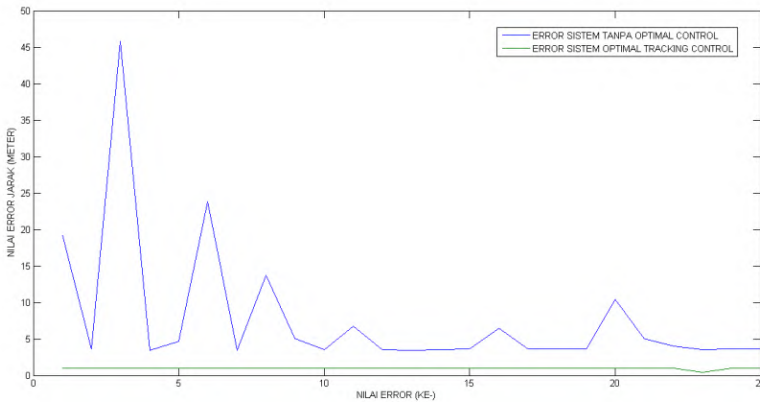
4.6.2 Pengujian sistem dengan Gangguan Angin sebesar 7 Knot

Pengujian sistem dengan gangguan angin sebesar 7 knot dilakukan dengan sudut datang angin sebesar 20° , 30° dan 40° . Data hasil simulasi ditampilkan pada tabel lampiran. Sedangkan untuk grafik error lintasan antara *desired* dan *actual trajectory* beserta *trajectory* sistem ditampilkan berikut ini.



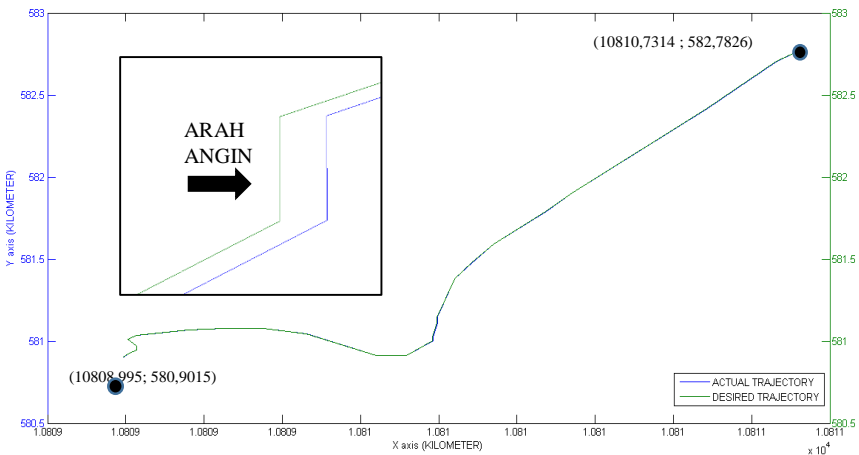
Gambar 4.14 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 7 knot sudut 20°

Gambar 4.14 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 7 knot arah sudut datang 20° .



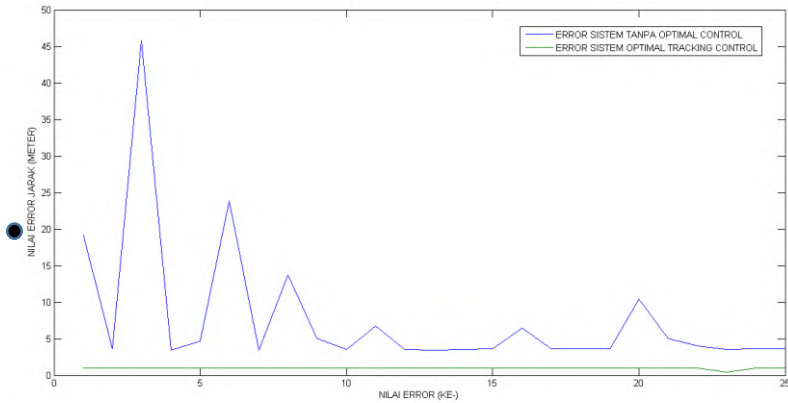
Gambar 4.15 Grafik error lintasan dengan gangguan angin 7 knot sudut 20°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 77,5 meter dan bersifat fluktuatif. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 1,03 meter.



Gambar 4.16 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 7 knot sudut 30°

Gambar 4.16 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 7 knot arah sudut datang 30° .



Gambar 4.17 Grafik error lintasan dengan gangguan angin 7 knot sudut 30°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 45,8 meter dan bersifat fluktuatif. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 1,03 meter.

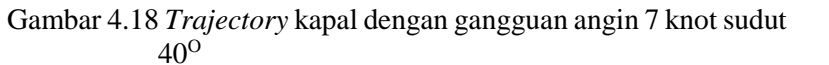
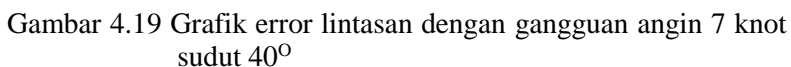


Figure 10 shows the error system response without optimal control. The error signal starts at 0, drops to approximately -0.00015 at 10 seconds, and then slowly returns to 0 by 100 seconds. The legend indicates 'ERROR SISTEM TANPA OPTIMAL CONTROL'.

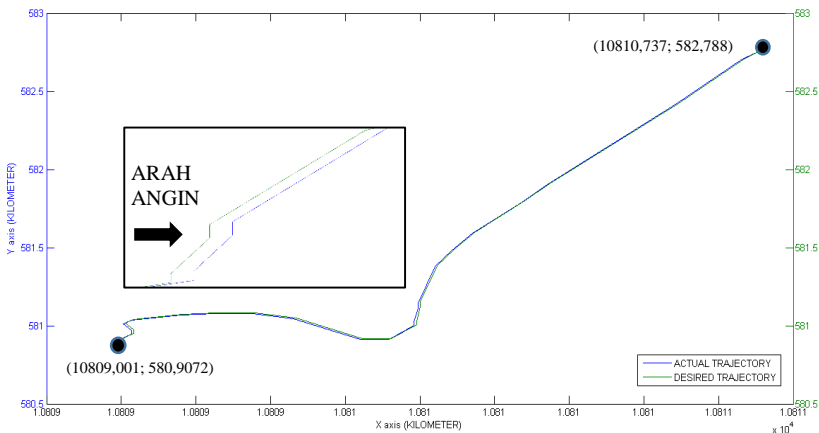


Gambar 4.19 Grafik error lintasan dengan gangguan angin 7 knot sudut 40°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 85,8 meter dan bersifat fluktuatif. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 1,03 meter.

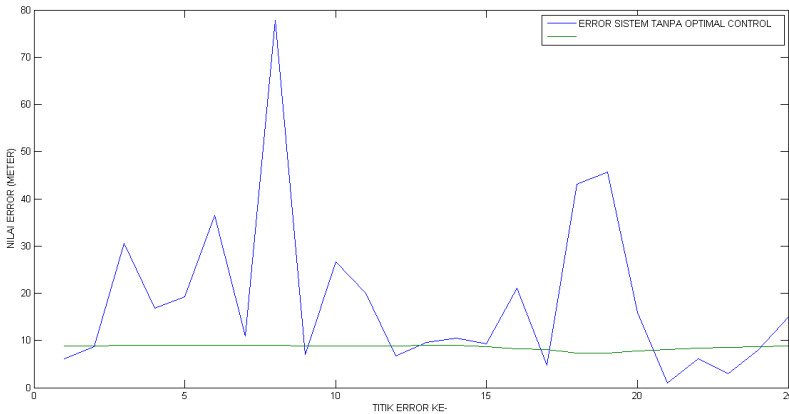
4.6.3 Pengujian sistem dengan Gangguan Angin sebesar 15 Knot

Pengujian sistem dengan gangguan angin sebesar 15 knot dilakukan dengan sudut datang angin sebesar 20° , 30° dan 40° . Data hasil simulasi ditampilkan pada tabel lampiran. Sedangkan untuk grafik error lintasan antara *desired* dan *actual trajectory* beserta *trajectory* sistem ditampilkan berikut ini.



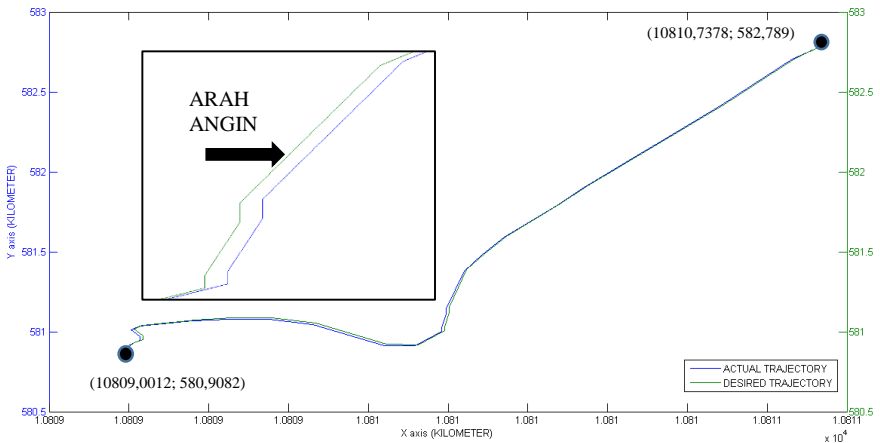
Gambar 4.20 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 15 knot sudut 20°

Gambar 4.20 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 15 knot arah sudut datang 20° .



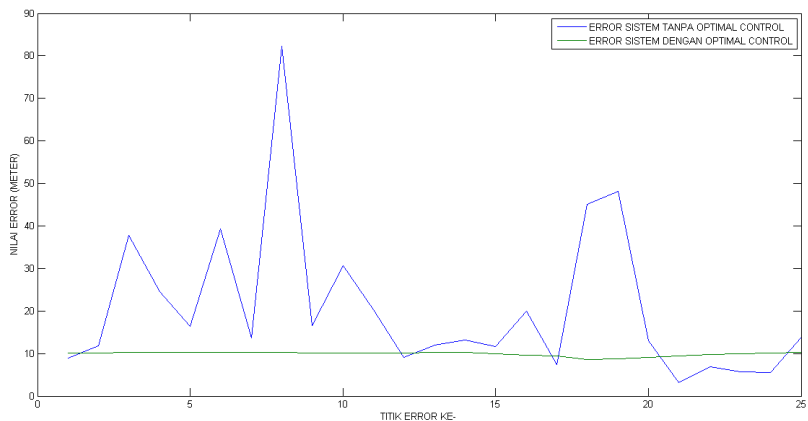
Gambar 4.21 *Trajectory* dengan gangguan angin 15 knot sudut 20°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 77 meter dan secara rata rata lebih besar dibandingkan dengan menggunakan gangguan 2 knot atau 7 knot. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 8,9 meter.



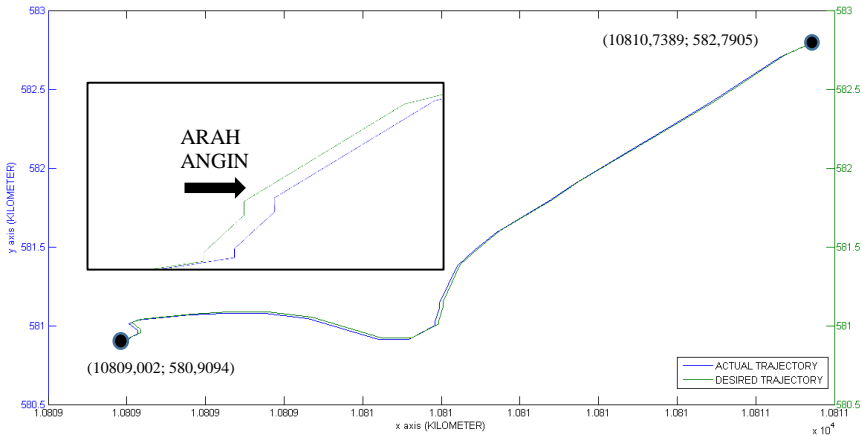
Gambar 4.22 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 15 knot sudut 30°

Gambar 4.22 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 15 knot arah sudut datang 30° .



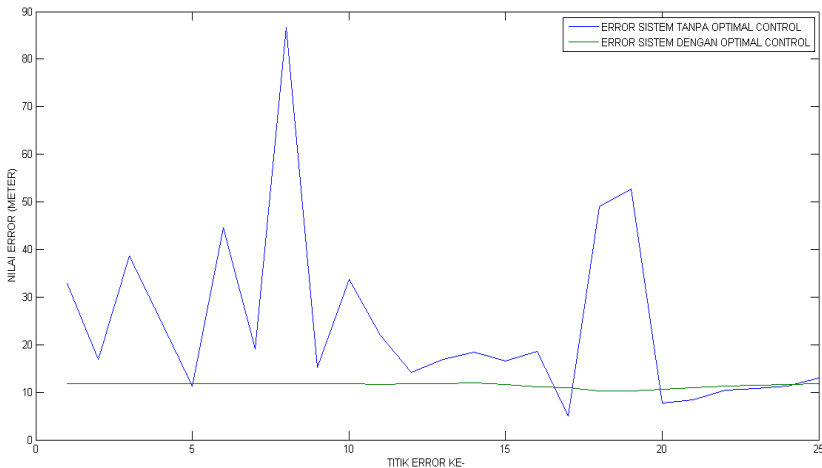
Gambar 4.23 *Trajectory* dengan gangguan angin 15 knot sudut 30°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 82,3 meter. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 10,3 meter.



Gambar 4.24 *Trajectory* kapal dengan gangguan angin 15 knot sudut 40°

Gambar 4.24 di atas adalah gambar *trajectory* hasil simulasi sistem *optimal control* dengan gangguan angin sebesar 15 knot arah sudut datang 40° .



Gambar 4.25 *Trajectory* dengan gangguan angin 15 knot sudut 40°

Error maksimal untuk sistem tanpa *optimal control* sebesar 86,6 meter. Sedangkan untuk sistem dengan *optimal control* nilai error yang dihasilkan sebesar 12 meter.

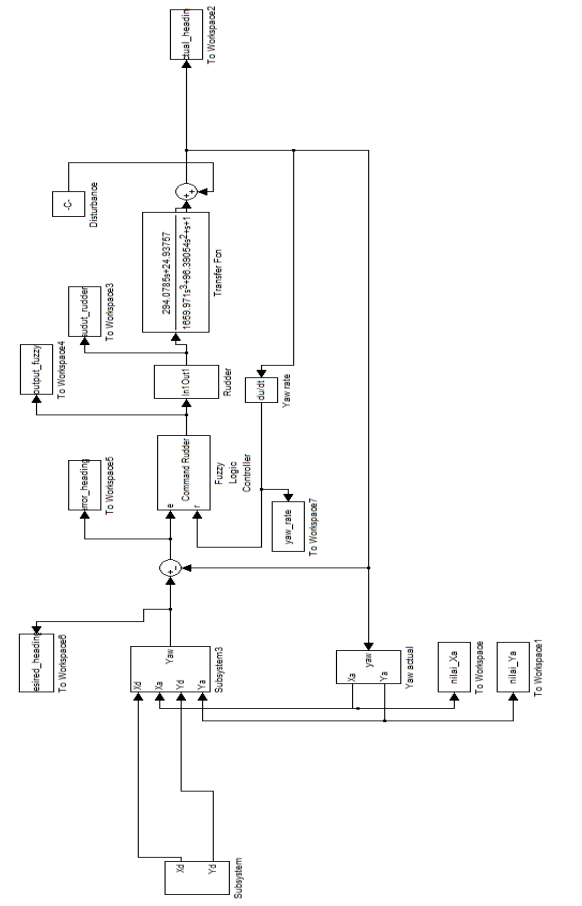
Dari simulasi yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa untuk gangguan 2 knot dan 7 knot sistem *optimal control* dapat mengatasi gangguan tersebut dengan error yang stabil sebesar 1,03 meter. Sedangkan untuk gangguan 15 knot yang merupakan besar angin maksimum di pelabuhan Arun, sistem *optimal control* mengalami error yang lebih besar, yakni maksimal sebesar 12 meter.

Nilai error tersebut masih dalam toleransi yang ditetapkan IMO (*International Maritime Organization*) yang mensyaratkan bahwa error maksimal untuk *maneuverability* adalah sebesar $0,1 \times L_{pp}$, sehingga untuk kapal tanker Tangguh Towuti sebesar 27,44 meter. Meskipun nilai error cenderung lebih besar, tetapi sistem *optimal control* masih dapat mengatasi error yang fluktuatif, sehingga penggunaan *optimal control* dapat memberikan nilai error yang stabil selama simulasi dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

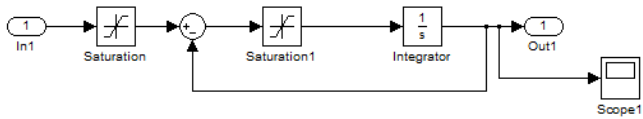
LAMPIRAN A

SIMULINK SISTEM *OPTIMAL TRACKING CONTROL* KAPAL TANKER TANGGUH TOWUTI

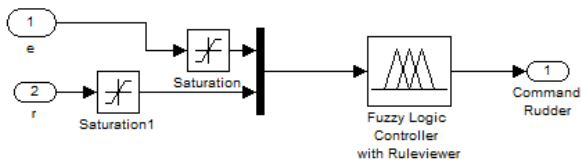


Subsistem Simulink:

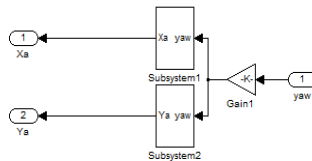
1. Rudder



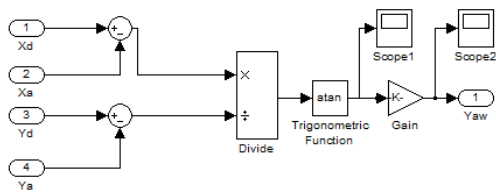
2. Fuzzy



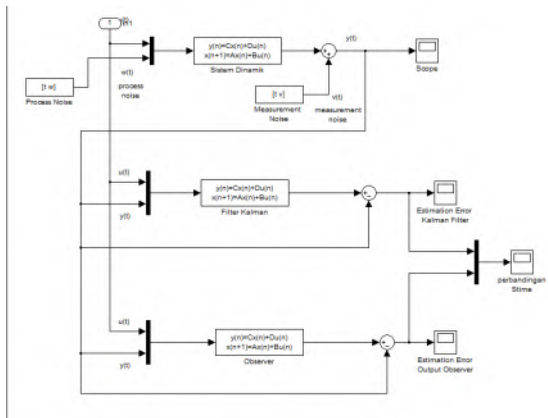
3. Yaw Actual



4. Desired Heading



5. Blok Filter Kalman



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B

DIMENSI KAPAL DAN PERHITUNGAN FUNGSI ALIH SISTEM MANUVER KAPAL

B.1 Data spesifikasi Kapal Tanker Tangguh Towuti:

No.	Besaran	Nilai
1	L _{pp} (panjang)	274.4 m
2	U (kecepatan)	19.65 knot
3	B (lebar)	43.4 m
4	T (tinggi)	26.0 m
5	C _B (koefisien blok)	0.7561
6	XG	0
7	A _δ (luasan <i>rudder</i>)	63,41 m ²
8	m (<i>displacement</i>)	112887.4 ton
9	R (jari jari girasi)	0.2L _{pp}
10	m' (massa <i>nondimensional</i>)	0,0097
11	XG' (<i>specific gravity in non dimensional</i>)	0

B.2 Perhitungan koefisien hidrodinamika (regresi Clarke persamaan 2.12 – 2.23)

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \quad (2.12)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T} \right)^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.041 \left(\frac{B}{T} \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.17 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_B B}{T} \quad (2.16)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.08 \left(\frac{B}{T} \right) \quad (2.17)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L} \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.19)$$

$$Y'_\delta = \rho \frac{\pi A_\delta}{4 LT} \quad (2.20)$$

$$N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta \quad (2.21)$$

$$I'_Z = m' \cdot X'_G + I'_r \quad (2.22)$$

$$I'_r = m' \cdot r^2 \quad (2.23)$$

B.3 Hasil Perhitungan koefisien hidrodinamika (regresi Clarke)

$$Y'_v = -0,03028704$$

$$Y'_r = -0,002728155$$

$$N'_v = -0,002975294$$

$$N'_r = -0,001482705$$

$$Y'_v = -0,042422775$$

$$Y'_r = 0,008050722$$

$$N'_v = -0,02050617$$

$$N'_r = -0,006386032$$

$$Y'_\delta = 0,00697702$$

$$N'_\delta = -0,00348851$$

$$I'_z = 0,03120639$$

$$I'_r = 0,03120639$$

$$M = \begin{bmatrix} 0,030296618 & 0,00272815 \\ 0,002975294 & 0,03268909 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 0,042422775 & -0,0080507 \\ 0,02050617 & 0,00638603 \end{bmatrix}$$

$$\det M = 1,94344645$$

$$\det N = 0,001170771$$

$$T_1 T_2 = 1659,971472$$

$$T_1 + T_2 = 96,39053727$$

$$K_R = 24,93757238$$

$$K_R T_3 = 294,0785031$$

$$T_3 = 11,79258745$$

Maka model dinamika Kapal Tanker Tangguh Towuti berdasarkan hasil perhitungan yaitu:

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1 + T_3 s)}{s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

$$\frac{\Psi}{\delta_R}(s) = \frac{24,93757 + 294,0785s}{s + 96,39054s^2 + 1659,971s^3}$$

LAMPIRAN C
DATA KOORDINAT PELAYARAN PELABUHAN ARUN

Tabel C1. Koordinat Pelayaran Pelabuhan Arun

No	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	Konversi <i>Latitude</i> ke kilometer	Konversi <i>Longitude</i> ke kilometer
1	5,2352	97,114	582,78246	10810,7305
2	5,2345	97,1134	582,70454	10810,6637
3	5,2336	97,1129	582,60435	10810,608
4	5,2328	97,1124	582,5153	10810,5524
5	5,2319	97,1118	582,41511	10810,4856
6	5,231	97,1112	582,31492	10810,4188
7	5,2301	97,1106	582,21473	10810,352
8	5,2292	97,11	582,11454	10810,2852
9	5,2282	97,1093	582,00322	10810,2073
10	5,2273	97,1087	581,90304	10810,1405
11	5,2263	97,1081	581,79172	10810,0737
12	5,2253	97,1074	581,6804	10809,9958
13	5,2245	97,1069	581,59134	10809,9401
14	5,2235	97,1064	581,48002	10809,8844
15	5,2226	97,106	581,37983	10809,8399
16	5,2218	97,1058	581,29078	10809,8177
17	5,2213	97,1057	581,23512	10809,8065
18	5,2208	97,1056	581,17946	10809,7954
19	5,2205	97,1056	581,14606	10809,7954
20	5,2202	97,1056	581,11266	10809,7954
21	5,22	97,1056	581,0904	10809,7954
22	5,2197	97,1056	581,057	10809,7954
23	5,2194	97,1055	581,02361	10809,7843

24	5,2192	97,1055	581,00134	10809,7843
25	5,219	97,1054	580,97908	10809,7731
26	5,2188	97,1053	580,95682	10809,762
27	5,2186	97,1051	580,93455	10809,7397
28	5,2184	97,1049	580,91229	10809,7175
29	5,2183	97,1048	580,90116	10809,7063
30	5,2182	97,1046	580,89002	10809,6841
31	5,2183	97,1044	580,90116	10809,6618
32	5,2184	97,1042	580,91229	10809,6395
33	5,2186	97,104	580,93455	10809,6173
34	5,2188	97,1038	580,95682	10809,595
35	5,219	97,1035	580,97908	10809,5616
36	5,2192	97,1032	581,00134	10809,5282
37	5,2194	97,1029	581,02361	10809,4948
38	5,2196	97,1026	581,04587	10809,4614
39	5,2197	97,1022	581,057	10809,4169
40	5,2198	97,1018	581,06814	10809,3724
41	5,2199	97,1016	581,07927	10809,3501
42	5,2199	97,1014	581,07927	10809,3278
43	5,2199	97,1012	581,07927	10809,3056
44	5,2199	97,1011	581,07927	10809,2945
45	5,2199	97,1009	581,07927	10809,2722
46	5,2199	97,1007	581,07927	10809,2499
47	5,2199	97,1005	581,07927	10809,2277
48	5,2199	97,1003	581,07927	10809,2054
49	5,2199	97,1001	581,07927	10809,1831
50	5,2198	97,0999	581,06814	10809,1609
51	5,2198	97,0998	581,06814	10809,1497
52	5,2199	97,0997	581,07927	10809,1386

53	5,2195	97,0987	581,03474	10809,0273
54	5,2194	97,0986	581,02361	10809,0162
55	5,2193	97,0985	581,01248	10809,005
56	5,2193	97,0985	581,01248	10809,005
57	5,2192	97,0985	581,00134	10809,005
58	5,2192	97,0986	581,00134	10809,0162
59	5,2191	97,0986	580,99021	10809,0162
60	5,219	97,0986	580,97908	10809,0162
61	5,2189	97,0987	580,96795	10809,0273
62	5,2188	97,0987	580,95682	10809,0273
63	5,2188	97,0987	580,95682	10809,0273
64	5,2187	97,0987	580,94568	10809,0273
65	5,2187	97,0987	580,94568	10809,0273
66	5,2187	97,0987	580,94568	10809,0273
67	5,2187	97,0987	580,94568	10809,0273
68	5,2187	97,0986	580,94568	10809,0162
69	5,2186	97,0986	580,93455	10809,0162
70	5,2185	97,0985	580,92342	10809,005
71	5,2185	97,0985	580,92342	10809,005
72	5,2183	97,0984	580,90116	10808,9939
73	5,2183	97,0983	580,90116	10808,9828
74	5,2182	97,0982	580,89002	10808,9716

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN D

DATA HASIL SIMULASI

Tabel D1. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 2 knot sudut 20⁰

NO	desired trajectory Xd	Yd	Actual trajectory Xa	Ya	Xa Kalman	Ya Kalman	Error jarak no KF	Error jarak KF
1	10810,73	582,782	10810,73	582,78	10810,731	582,78	1,296	1,028
2	10810,664	582,705	10810,665	582,7	10810,665	582,7	1,028	1,028
3	10810,486	582,415	10810,497	582,43	10810,486	582,42	20,75	1,028
4	10810,14	581,903	10810,141	581,9	10810,141	581,9	1,028	1,028
5	10810,074	581,792	10810,063	581,78	10810,075	581,79	19,33	1,028
6	10809,94	581,591	10809,958	581,62	10809,941	581,59	33,36	1,028
7	10809,884	581,48	10809,885	581,48	10809,885	581,48	1,028	1,028
8	10809,84	581,38	10809,83	581,34	10809,841	581,38	44,29	1,028
9	10809,795	581,146	10809,796	581,15	10809,796	581,15	5,053	1,028
10	10809,795	581,113	10809,796	581,11	10809,796	581,11	1,028	1,028
11	10809,784	581,024	10809,785	581,02	10809,785	581,02	3,348	1,028
12	10809,784	581,001	10809,785	581,01	10809,785	581	6,712	1,028
13	10809,717	580,912	10809,718	580,91	10809,718	580,91	1,028	1,028
14	10809,64	580,912	10809,64	580,91	10809,64	580,91	1,028	1,028
15	10809,461	581,046	10809,462	581,05	10809,462	581,05	1,028	1,028
16	10809,35	581,079	10809,373	581,07	10809,351	581,08	25,89	1,028
17	10809,328	581,079	10809,328	581,08	10809,329	581,08	1,028	1,028
18	10809,25	581,079	10809,25	581,08	10809,25	581,08	1,028	1,028
19	10809,161	581,068	10809,161	581,07	10809,161	581,07	1,028	1,028
20	10809,027	581,035	10809,025	581,03	10809,028	581,03	4,199	1,028
21	10809,005	581,012	10809,006	581,01	10809,006	581,01	1,028	1,028
22	10809,027	580,968	10809,028	580,96	10809,027	580,97	5,873	1,042
23	10809,027	580,946	10809,028	580,95	10809,028	580,95	1,028	1,028
24	10809,005	580,923	10809,006	580,92	10809,006	580,92	1,028	1,028

25	10808,994	580,901	10808,995	580,9	10808,995	580,9	1,028	1,028
----	-----------	---------	-----------	-------	-----------	-------	-------	-------

Tabel D2. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 2 knot sudut 30^o

NO	desired trajectory		actual trajectory				Error Jarak no KF	Error jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya	XaKF	YaKF		
1	10810,73	582,7825	10810,73	582,783	10810,73	582,783	1,224	1,03
2	10810,66	582,7045	10810,67	582,706	10810,66	582,705	3,013	1,03
3	10810,49	582,4151	10810,5	582,434	10810,49	582,416	22,78	1,03
4	10810,14	581,903	10810,14	581,905	10810,14	581,904	3,069	1,03
5	10810,07	581,7917	10810,06	581,777	10810,07	581,792	17,32	1,03
6	10809,94	581,5913	10809,96	581,621	10809,94	581,592	35,38	1,03
7	10809,88	581,48	10809,89	581,482	10809,89	581,481	3,068	1,03
8	10809,84	581,3798	10809,83	581,338	10809,84	581,38	42,55	1,03
9	10809,8	581,1461	10809,8	581,152	10809,8	581,146	6,862	1,03
10	10809,8	581,1127	10809,8	581,145	10809,8	581,113	33,31	1,03
11	10809,78	581,0236	10809,79	581,045	10809,79	581,024	21,29	1,03
12	10809,78	581,0013	10809,79	581,009	10809,79	581,002	8,461	1,03
13	10809,72	580,9123	10809,72	580,914	10809,72	580,913	3,06	1,03
14	10809,64	580,9123	10809,64	580,914	10809,64	580,913	3,085	1,03
15	10809,46	581,0459	10809,46	581,047	10809,46	581,046	2,676	1,03
16	10809,35	581,0793	10809,37	581,069	10809,35	581,079	26,6	1,03
17	10809,33	581,0793	10809,33	581,08	10809,33	581,079	1,97	1,03
18	10809,25	581,0793	10809,25	581,08	10809,25	581,078	1,431	1,03
19	10809,16	581,0681	10809,16	581,069	10809,16	581,067	1,751	1,03
20	10809,03	581,0347	10809,03	581,033	10809,03	581,034	2,254	1,03
21	10809,01	581,0125	10809,01	581,013	10809,01	581,012	2,421	1,03
22	10809,03	580,9679	10809,03	580,964	10809,03	580,969	4,954	1,04
23	10809,03	580,9457	10809,03	580,947	10809,03	580,946	2,752	1,03
24	10809,01	580,9234	10809,01	580,925	10809,01	580,924	2,844	1,03

25	10808,99	580,9012	10809	580,903	10808,99	580,902	3,007	1,03
----	----------	----------	-------	---------	----------	---------	-------	------

Tabel D3. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 2 knot sudut 40^o

NO	desired trajectory		actual trajectory				Error Jarak no KF	Error Jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya	XaKF	YaKF		
1	10810,73	582,7825	10810,73	582,783	10810,73	582,783	1,554	1,028
2	10810,66	582,7045	10810,67	582,707	10810,66	582,705	3,397	1,028
3	10810,49	582,4151	10810,5	582,434	10810,49	582,416	23,17	1,028
4	10810,14	581,903	10810,14	581,905	10810,14	581,904	3,457	1,028
5	10810,07	581,7917	10810,06	581,777	10810,07	581,792	16,94	1,028
6	10809,94	581,5913	10809,96	581,621	10809,94	581,592	35,76	1,028
7	10809,88	581,48	10809,89	581,482	10809,89	581,481	3,456	1,028
8	10809,84	581,3798	10809,83	581,338	10809,84	581,38	42,23	1,028
9	10809,8	581,1461	10809,8	581,153	10809,8	581,146	7,219	1,028
10	10809,8	581,1127	10809,8	581,115	10809,8	581,113	3,363	1,028
11	10809,78	581,0236	10809,79	581,022	10809,79	581,024	3,112	1,028
12	10809,78	581,0013	10809,79	581,01	10809,79	581,002	8,806	1,028
13	10809,72	580,9123	10809,72	580,915	10809,72	580,913	3,448	1,028
14	10809,64	580,9123	10809,64	580,915	10809,64	580,913	3,474	1,028
15	10809,46	581,0459	10809,46	581,047	10809,46	581,046	3,044	1,028
16	10809,35	581,0793	10809,37	581,069	10809,35	581,079	26,74	1,028
17	10809,33	581,0793	10809,33	581,08	10809,33	581,079	2,316	1,028
18	10809,25	581,0793	10809,25	581,08	10809,25	581,078	1,785	1,028
19	10809,16	581,0681	10809,16	581,069	10809,16	581,067	2,097	1,028
20	10809,03	581,0347	10809,03	581,033	10809,03	581,034	1,914	1,028
21	10809,01	581,0125	10809,01	581,014	10809,01	581,012	2,779	1,028
22	10809,03	580,9679	10809,03	580,964	10809,03	580,969	4,86	1,0417
23	10809,03	580,9457	10809,03	580,947	10809,03	580,946	3,124	1,028
24	10809,01	580,9234	10809,01	580,925	10809,01	580,924	3,22	1,028

25	10808,99	580,9012	10809	580,903	10808,99	580,902	3,391	1,028
----	----------	----------	-------	---------	----------	---------	-------	-------

Tabel D4. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 7 knot sudut 20⁰

NO	desired trajectory		actual trajectory				Error jarak no KF	Error jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya	XaKF	YaKF		
1	10810,73	582,782	10810,709	582,7562	10810,73	582,7826	34,01	1,028
2	10810,66	582,705	10810,665	582,7047	10810,66	582,7047	1,028	1,028
3	10810,49	582,415	10810,529	582,4792	10810,49	582,4154	77,5	1,028
4	10810,14	581,903	10810,141	581,9034	10810,14	581,9034	1,028	1,028
5	10810,07	581,792	10810,07	581,786	10810,07	581,7921	6,64	1,028
6	10809,94	581,591	10809,914	581,5384	10809,94	581,5918	58,93	1,028
7	10809,88	581,48	10809,885	581,4805	10809,89	581,4805	1,028	1,028
8	10809,84	581,38	10809,852	581,4046	10809,84	581,3803	27,42	1,028
9	10809,8	581,146	10809,796	581,1331	10809,8	581,1464	13,04	1,028
10	10809,8	581,113	10809,796	581,113	10809,8	581,113	1,028	1,028
11	10809,78	581,024	10809,789	581,035	10809,79	581,0239	12,36	1,028
12	10809,78	581,001	10809,785	581,0016	10809,79	581,0016	1,028	1,028
13	10809,72	580,912	10809,718	580,9127	10809,72	580,9127	1,028	1,028
14	10809,64	580,912	10809,64	580,9127	10809,64	580,9127	1,028	1,028
15	10809,46	581,046	10809,462	581,0459	10809,46	581,046	1,028	1,028
16	10809,35	581,079	10809,34	581,0791	10809,35	581,0793	9,665	1,028
17	10809,33	581,079	10809,329	581,0791	10809,33	581,0792	1,028	1,028
18	10809,25	581,079	10809,251	581,0789	10809,25	581,079	1,028	1,028
19	10809,16	581,068	10809,162	581,0677	10809,16	581,0678	1,028	1,028
20	10809,03	581,035	10809,035	581,0371	10809,03	581,0345	8,08	1,028
21	10809,01	581,012	10809,006	581,0012	10809,01	581,0123	11,37	1,028

22	10809,03	580,968	10809,028	580,9647	10809,03	580,9677	3,417	1,028
23	10809,03	580,946	10809,028	580,9466	10809,03	580,9454	1,35	0,4647
24	10809,01	580,923	10809,006	580,9233	10809,01	580,9233	1,028	1,028
25	10808,99	580,901	10808,995	580,9011	10808,99	580,9011	1,028	1,028

Tabel D5. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 7 knot sudut 30°

NO	desired trajectory		actual trajectory				Error jarak no KF	Error Jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya	XaKF	YaKF		
1	10810,73	582,782	10810,712	582,7592	10810,73	582,7826	19,23	1,028
2	10810,66	582,705	10810,668	582,7077	10810,66	582,7047	3,594	1,028
3	10810,49	582,415	10810,532	582,4822	10810,49	582,4154	45,82	1,028
4	10810,14	581,903	10810,144	581,9064	10810,14	581,9034	3,481	1,028
5	10810,07	581,792	10810,078	581,791	10810,07	581,7921	4,705	1,028
6	10809,94	581,591	10809,917	581,5414	10809,94	581,5918	23,87	1,028
7	10809,88	581,48	10809,888	581,4835	10809,89	581,4805	3,456	1,028
8	10809,84	581,38	10809,855	581,4076	10809,84	581,3803	13,77	1,028
9	10809,8	581,146	10809,799	581,1361	10809,8	581,1464	5,077	1,028
10	10809,8	581,113	10809,799	581,116	10809,8	581,113	3,536	1,028
11	10809,78	581,024	10809,792	581,038	10809,79	581,0239	6,707	1,028
12	10809,78	581,001	10809,788	581,0046	10809,79	581,0016	3,556	1,028
13	10809,72	580,912	10809,721	580,9157	10809,72	580,9127	3,482	1,028
14	10809,64	580,912	10809,643	580,9157	10809,64	580,9127	3,5	1,028
15	10809,46	581,046	10809,465	581,0489	10809,46	581,046	3,624	1,028
16	10809,35	581,079	10809,343	581,0821	10809,35	581,0793	6,445	1,028
17	10809,33	581,079	10809,332	581,0821	10809,33	581,0792	3,645	1,028
18	10809,25	581,079	10809,254	581,0819	10809,25	581,079	3,611	1,028
19	10809,16	581,068	10809,165	581,0707	10809,16	581,0678	3,605	1,028
20	10809,03	581,035	10809,038	581,0401	10809,03	581,0345	10,46	1,028

21	10809,01	581,012	10809,009	581,0042	10809,01	581,0123	5,065	1,028
22	10809,03	580,968	10809,031	580,9677	10809,03	580,9677	4,032	1,028
23	10809,03	580,946	10809,031	580,9496	10809,03	580,9454	3,496	0,4647
24	10809,01	580,923	10809,009	580,9263	10809,01	580,9233	3,645	1,028
25	10808,99	580,901	10808,998	580,9041	10808,99	580,9011	3,637	1,028

Tabel D6. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 7 knot sudut 40°

NO	desired trajectory		actual trajectory		XaKF	YaKF	Error jarak no KF	Error Jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya				
1	10810,73	582,782	10810,715	582,7622	10810,73	582,7826	25,57	1,028
2	10810,66	582,705	10810,671	582,7107	10810,66	582,7047	9,347	1,028
3	10810,49	582,415	10810,535	582,4852	10810,49	582,4154	85,85	1,028
4	10810,14	581,903	10810,147	581,9094	10810,14	581,9034	9,451	1,028
5	10810,07	581,792	10810,08	581,792	10810,07	581,7921	6,633	1,028
6	10809,94	581,591	10809,92	581,5444	10809,94	581,5918	50,98	1,028
7	10809,88	581,48	10809,891	581,4865	10809,89	581,4805	9,463	1,028
8	10809,84	581,38	10809,858	581,4106	10809,84	581,3803	35,52	1,028
9	10809,8	581,146	10809,802	581,1391	10809,8	581,1464	9,885	1,028
10	10809,8	581,113	10809,802	581,119	10809,8	581,113	9,413	1,028
11	10809,78	581,024	10809,795	581,041	10809,79	581,0239	20,46	1,028
12	10809,78	581,001	10809,791	581,0076	10809,79	581,0016	9,395	1,028
13	10809,72	580,912	10809,724	580,9187	10809,72	580,9127	9,45	1,028
14	10809,64	580,912	10809,646	580,9187	10809,64	580,9127	9,439	1,028
15	10809,46	581,046	10809,468	581,0519	10809,46	581,046	9,285	1,028
16	10809,35	581,079	10809,346	581,0851	10809,35	581,0793	6,925	1,028
17	10809,33	581,079	10809,335	581,0851	10809,33	581,0792	9,133	1,028
18	10809,25	581,079	10809,257	581,0849	10809,25	581,079	8,949	1,028
19	10809,16	581,068	10809,168	581,0737	10809,16	581,0678	8,931	1,028
20	10809,03	581,035	10809,041	581,0431	10809,03	581,0345	16,08	1,028

21	10809,01	581,012	10809,012	581,0072	10809,01	581,0123	8,92	1,028
22	10809,03	580,968	10809,034	580,9707	10809,03	580,9677	7,513	1,028
23	10809,03	580,946	10809,034	580,9526	10809,03	580,9454	9,833	0,4647
24	10809,01	580,923	10809,012	580,9293	10809,01	580,9233	9,163	1,028
25	10808,99	580,901	10809,001	580,9071	10808,99	580,9011	9,237	1,028

Tabel D7. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 15 knot sudut 20^o

NO	desired trajectory		actual trajectory				Error jarak no KF	Error jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya	XaKF	YaKF		
1	10810,73	582,7825	10810,74	582,7862	10810,74	582,7884	6,041	8,786
2	10810,66	582,7045	10810,67	582,7109	10810,67	582,7106	8,697	8,847
3	10810,49	582,4151	10810,51	582,4382	10810,49	582,4213	30,51	8,919
4	10810,14	581,903	10810,15	581,9136	10810,15	581,9093	16,81	8,927
5	10810,07	581,7917	10810,06	581,7758	10810,08	581,798	19,2	8,93
6	10809,94	581,5913	10809,96	581,6203	10809,95	581,5976	36,42	8,93
7	10809,88	581,48	10809,89	581,4875	10809,89	581,4863	10,9	8,926
8	10809,84	581,3798	10809,87	581,3065	10809,85	581,3861	77,82	8,917
9	10809,8	581,1461	10809,8	581,151	10809,8	581,1521	7,027	8,833
10	10809,8	581,1127	10809,8	581,1389	10809,8	581,1186	26,7	8,803
11	10809,78	581,0236	10809,8	581,0104	10809,79	581,0295	19,99	8,761
12	10809,78	581,0013	10809,79	581,008	10809,79	581,0072	6,705	8,776
13	10809,72	580,9123	10809,72	580,9218	10809,72	580,9185	9,61	8,913
14	10809,64	580,9123	10809,65	580,9179	10809,65	580,9188	10,45	8,956
15	10809,46	581,0459	10809,46	581,0552	10809,47	581,0516	9,347	8,674
16	10809,35	581,0793	10809,33	581,0854	10809,36	581,0845	21,08	8,228
17	10809,33	581,0793	10809,32	581,0783	10809,33	581,0843	4,692	8,046
18	10809,25	581,0793	10809,29	581,0782	10809,26	581,084	43,02	7,327
19	10809,16	581,0681	10809,21	581,0782	10809,17	581,0728	45,73	7,348
20	10809,03	581,0347	10809,02	581,0228	10809,03	581,0396	15,85	7,75

21	10809,01	581,0125	10809,01	581,0119	10809,01	581,0175	1,051	8,04
22	10809,03	580,9679	10809,02	580,9725	10809,03	580,9733	6,181	8,383
23	10809,03	580,9457	10809,03	580,9484	10809,03	580,9512	2,935	8,521
24	10809,01	580,9234	10809	580,9159	10809,01	580,9292	7,99	8,695
25	10808,99	580,9012	10809	580,8867	10809	580,9072	14,95	8,862

Tabel D8. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 15 knot sudut 30°

NO	desired trajectory		actual trajectory				Error Jarak no KF	Error Jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya	XaKF	YaKF		
1	10810,73	582,7825	10810,74	582,7882	10810,74	582,7894	8,855	10,12
2	10810,66	582,7045	10810,67	582,7109	10810,67	582,7116	11,81	10,19
3	10810,49	582,4151	10810,52	582,4382	10810,49	582,4224	37,81	10,26
4	10810,14	581,903	10810,16	581,9156	10810,15	581,9104	24,55	10,27
5	10810,07	581,7917	10810,07	581,7778	10810,08	581,799	16,43	10,27
6	10809,94	581,5913	10809,96	581,6223	10809,95	581,5987	39,23	10,27
7	10809,88	581,48	10809,89	581,4895	10809,89	581,4873	13,73	10,27
8	10809,84	581,3798	10809,87	581,3025	10809,85	581,3871	82,26	10,26
9	10809,8	581,1461	10809,8	581,161	10809,8	581,1531	16,5	10,17
10	10809,8	581,1127	10809,81	581,1409	10809,8	581,1197	30,67	10,14
11	10809,78	581,0236	10809,8	581,0124	10809,79	581,0305	20,37	10,1
12	10809,78	581,0013	10809,79	581,01	10809,79	581,0083	9,14	10,11
13	10809,72	580,9123	10809,72	580,9238	10809,72	580,9196	12,01	10,26
14	10809,64	580,9123	10809,65	580,9199	10809,65	580,9198	13,23	10,3
15	10809,46	581,0459	10809,46	581,0572	10809,47	581,0527	11,68	10,01
16	10809,35	581,0793	10809,33	581,0874	10809,36	581,0855	19,91	9,554
17	10809,33	581,0793	10809,33	581,085	10809,33	581,0854	7,423	9,371
18	10809,25	581,0793	10809,29	581,0802	10809,26	581,085	45,02	8,657
19	10809,16	581,0681	10809,21	581,0802	10809,17	581,0739	48,15	8,677
20	10809,03	581,0347	10809,02	581,0248	10809,03	581,0407	13,03	9,075

21	10809,01	581,0125	10809,01	581,0139	10809,01	581,0186	3,218	9,365
22	10809,03	580,9679	10809,03	580,9745	10809,03	580,9744	6,925	9,712
23	10809,03	580,9457	10809,03	580,9504	10809,03	580,9523	5,626	9,852
24	10809,01	580,9234	10809	580,9179	10809,01	580,9302	5,582	10,03
25	10808,99	580,9012	10809	580,8887	10809	580,9083	13,77	10,2

Tabel D9. Perbandingan *trajectory* Kapal Tanker Tangguh Towuti dengan gangguan angin 15 knot sudut 40⁰

NO	desired trajectory		actual trajectory				Error Jarak no KF	Error Jarak KF
	Xd	Yd	Xa	Ya	XaKF	YaKF		
1	10810,73	582,7825	10810,74	582,8119	10810,74	582,7906	32,85	11,732
2	10810,66	582,7045	10810,68	582,7166	10810,67	582,7128	16,83	11,796
3	10810,49	582,4151	10810,51	582,444	10810,49	582,4236	38,62	11,871
4	10810,14	581,903	10810,16	581,9193	10810,15	581,9115	24,91	11,88
5	10810,07	581,7917	10810,07	581,7815	10810,08	581,8002	11,33	11,883
6	10809,94	581,5913	10809,97	581,6261	10809,95	581,5998	44,49	11,883
7	10809,88	581,48	10809,9	581,4933	10809,89	581,4885	19,03	11,879
8	10809,84	581,3798	10809,87	581,2992	10809,85	581,3883	86,63	11,87
9	10809,8	581,1461	10809,81	581,1568	10809,8	581,1543	15,16	11,781
10	10809,8	581,1127	10809,81	581,1446	10809,8	581,1208	33,73	11,75
11	10809,78	581,0236	10809,81	581,0162	10809,79	581,0317	22,06	11,706
12	10809,78	581,0013	10809,79	581,0137	10809,79	581,0095	14,1	11,722
13	10809,72	580,9123	10809,72	580,9275	10809,73	580,9207	16,88	11,865
14	10809,64	580,9123	10809,65	580,9237	10809,65	580,921	18,48	11,913
15	10809,46	581,0459	10809,47	581,0609	10809,47	581,0538	16,48	11,616
16	10809,35	581,0793	10809,34	581,0911	10809,36	581,0867	18,68	11,159
17	10809,33	581,0793	10809,33	581,0841	10809,34	581,0865	4,94	10,976
18	10809,25	581,0793	10809,3	581,084	10809,26	581,0862	48,98	10,263
19	10809,16	581,0681	10809,21	581,084	10809,17	581,0751	52,79	10,283
20	10809,03	581,0347	10809,02	581,0286	10809,04	581,0418	7,759	10,679

21	10809,01	581,0125	10809,01	581,0177	10809,01	581,0197	8,414	10,969
22	10809,03	580,9679	10809,03	580,9783	10809,04	580,9755	10,46	11,317
23	10809,03	580,9457	10809,03	580,9542	10809,04	580,9534	10,86	11,459
24	10809,01	580,9234	10809,01	580,9156	10809,01	580,9314	11,26	11,637
25	10808,99	580,9012	10809	580,8925	10809	580,9094	13	11,811

[illegible]

Tabel E3. Parameter gaya angin pada arah yaw (Isherwood 1972)

γ_w (deg)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	S.E.
10	0.0596	0.061	—	—	—	−0.074	0.0048
20	0.1106	0.204	—	—	—	−0.170	0.0074
30	0.2258	0.245	—	—	—	−0.380	0.0105
40	0.2017	0.457	—	0.0067	—	−0.472	0.0137
50	0.1759	0.573	—	0.0118	—	−0.523	0.0149
60	0.1925	0.480	—	0.0115	—	−0.546	0.0133
70	0.2133	0.315	—	0.0081	—	−0.526	0.0125
80	0.1827	0.254	—	0.0053	—	−0.443	0.0123
90	0.2627	—	—	—	—	−0.508	0.0141
100	0.2102	—	−0.0195	—	0.0335	−0.492	0.0146
110	0.1567	—	−0.0258	—	0.0497	−0.457	0.0163
120	0.0801	—	−0.0311	—	0.0740	−0.396	0.0179
130	−0.0189	—	−0.0488	0.0101	0.1128	−0.420	0.0166
140	0.0256	—	−0.0422	0.0100	0.0889	−0.463	0.0162
150	0.0552	—	−0.0381	0.0109	0.0689	−0.476	0.0141
160	0.0881	—	−0.0306	0.0091	0.0366	−0.415	0.0105
170	0.0851	—	−0.0122	0.0025	—	−0.220	0.0057
Mean S.E.							0.0127

E2. Perhitungan Koefisien Gaya dan Momen Angin (Persamaan 2.27-2.32)

$$X_{wind} = \frac{1}{2} C_X(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T \quad (2.27)$$

$$Y_{wind} = \frac{1}{2} C_Y(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L \quad (2.28)$$

$$N_{wind} = \frac{1}{2} C_N(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L L \quad (2.29)$$

$$C_x = A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L^2} + A_2 \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \frac{L}{B} + A_4 \frac{S}{L} + A_5 \frac{C}{L} + A_6 M \quad (2.30)$$

$$C_Y = B_0 + B_1 \frac{2A_L}{L^2} + B_2 \frac{2A_T}{B^2} + B_3 \frac{L}{B} + B_4 \frac{S}{L} + B_5 \frac{C}{L} + B_6 \frac{A_{SS}}{A_L} \quad (2.31)$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Telah dihasilkan sebuah rancangan sistem kendali logika *fuzzy* untuk mendapatkan *optimal tracking* pada Kapal Tanker Tangguh Towuti di Pelabuhan Arun dengan memanfaatkan filter Kalman untuk mendapatkan error lintasan yang lebih kecil.
2. Basis aturan logika *fuzzy* dapat terintegrasi dengan algoritma filter Kalman sehingga didapatkan sistem kendali optimal pada *trajectory* kapal dengan error lintasan yang kecil.
3. Koefisien hidrodinamika kapal tanker Tangguh Towuti valid, dengan nilai error terbesar adalah 0,01016 dan nilai error terkecil adalah 0,00041.
4. Error lintasan yang didapatkan dari simulasi *optimal tracking control* pada kapal relatif stabil sebesar 1,03 meter.
5. Performansi sistem *optimal tracking control* pada kapal mampu menghasilkan *trajectory* sesuai dengan peraturan pelabuhan. Nilai error jarak maksimum 12 meter untuk gangguan angin sebesar 15 knot arah sudut datang 20° , 30° , dan 40° .

5.2 Saran

1. Penelitian berikutnya dapat menggunakan data AIS (*Automatic Identification System*) untuk penentuan *heading* dan lokasi kapal secara *real time*.
2. Dalam perancangan harus memperhatikan faktor-faktor gangguan lainnya, diantaranya adalah tinggi gelombang, arus laut serta lalu lintas laut di sekitar Pelabuhan Arun.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ã, W. G. (2007). Maneuvering control and trajectory tracking of very large crude carrier. 932-945.
- Andersen, P. (2007). Wind Forces on Container Ships. *Polytechnic Interim Project*.
- Arifin, S. (n.d.). *Sistem Fuzzy*. Surabaya: Teknik Fisika ITS.
- Breivik, M. (2004). Path Following for Marine Surface Vessels. *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No.04CH37600)*, 2282-2289.
- Christopher, A. (1996). ship designs.
- Fossen, T. (2009). Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs. *IEEE Control Systems Magazine*, 33-46.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. New York, USA: John Wiley & Sons Ltd.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*.
- Ghanai, M. (2010). Kalman Filter in Control and Modeling.
- Gunawan, R. (n.d.). Perancangan Sistem Kontrol Sandar Kapal Otomatis Berbasis Logika Fuzzy di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. *JURNAL TEKNIK POMITS*.
- Morawski, L. (2008). Ship Control in Manoeuvring Situations with Fuzzy Logic Controllers. 2, 77-84.
- Moreira, L. (2007). Path following control system for a tanker ship model . *Ocean Engineering*, 2074-2085.
- Shipping, A. B. (2006). *GUIDE FOR VESSEL MANEUVERABILITY*. Houston.
- Vinaya, A. A. (2013). Perancangan Sistem Kontrol Trajectory pada Kondisi Gangguan Arus Laut Non Uniform di Ketapang-Gilimanuk. *JURNAL TEKNIK POMITS*, 2(2).
- Yuanita, D. M. (2013). Penggunaan Penyelesaian Persamaan Riccati Aljabar Waktu Diskrit pada Kendali Optimal Linier Kuadratik.
- Zhang, J. (2013). Ship Trajectory Control Optimization in Anti-collision Maneuvering. *the International Journal on Marine Navigation and Safety on Sea Transportation*.
- Zhang, L.-J. (2009). NN-Adaptive Output Feedback for Path Tracking Control of A Surface Ship at High Speed. *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009*, 2869-2874.



BIODATA PENULIS

ADIP TRI CAHYOKO

Saya adalah anak ketiga dari tiga bersaudara yang lahir dari pasangan Siswoyo dan Misti. Saya lahir pada tanggal 12 Januari 1994 di kabupaten Sidoarjo. Saya menempuh pendidikan formal di SDN Ngampelsari, SMPN 2 Candi, SMAN 2 Sidoarjo, dan selanjutnya di program studi S1 Teknik Fisika ITS.

Selama masa kuliah, saya juga aktif mengikuti kegiatan organisasi maupun kepanitiaan event di kampus ITS. Saya memulai kegiatan organisasi sebagai staff departemen Internal HMTF ITS. Saya juga aktif menjadi panitia kegiatan di ITS diantaranya adalah Gelar Karya PKM yang diselenggarakan oleh BEM ITS pada tahun 2013, serta panitia Gerigi ITS pada tahun 2014. Pada tahun 2014 saya juga bergabung dengan Laboratorium Rekayasa dan Instrumentasi (LARINS) sebagai asisten laboratorium. Kegiatan yang dilakukan pada saat ini menjadi asisten laboratorium di antaranya adalah menyiapkan peralatan praktikum untuk adik tingkat, serta menjadi pengurus asisten laboratorium. Semoga tugas akhir saya dapat bermanfaat bagi siapapun yang membacanya.

Terima kasih